

## 整体装配式预应力板柱节点摩擦性能的试验研究\*

吴丽丽<sup>1,2†</sup>, 王芮<sup>1,2</sup>, 谢灵慧<sup>1,2</sup>, 贾丽娜<sup>1,2</sup>

(1.煤炭资源与安全开采国家重点实验室(中国矿业大学),北京 100083;

2.中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院,北京 100083)

**摘要:**通过对6个整体装配式预应力板柱结构节点试件的试验研究,分析了板柱节点灌缝的胶结材料(如细石混凝土)强度、预应力大小、外加剂等因素对板柱节点界面摩擦性能的影响,并对比了板柱节点处存在细石混凝土胶结材料与否则时的差异.试验结果表明:板柱节点处灌缝细石混凝土会显著提高节点摩擦性能,与不灌缝的节点试件相比,摩擦性能提高幅度在35%以上.细石混凝土的强度、施加预应力大小、外加剂种类也会不同程度影响节点的摩擦性能.当细石混凝土立方体抗压强度由30 MPa增加到40 MPa时,界面摩擦性能提高约9.8%.预应力从300 kN增大到450 kN时,节点界面摩擦性能提高约55.1%,膨胀剂添加后对节点界面摩擦性能也有提高作用,但是幅度很小.

**关键词:**整体装配式;板柱节点;摩擦性能;预应力;外加剂

**中图分类号:** TU392.4; TU317.1

**文献标志码:** A

## Experimental Study on Friction Performance of Integral Prefabricated Prestressed Slab-column Joints

WU Lili<sup>1,2†</sup>, WANG Rui<sup>1,2</sup>, XIE Linghui<sup>1,2</sup>, JIA Lina<sup>1,2</sup>

(1.State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China; 2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The influences of cement-based material (such as fine aggregate concrete) strength, prestressing, additive admixture and other factors on the friction performances of the integral prefabricated prestressed slab-column joint structures were analyzed through experimental study on 6 joints. The difference between the slab column joints with and without fine stone concrete cement material was also compared. The results show that fine stone concrete at the slab column joints can significantly improve the friction performance. The friction performance was increased by more than 35% when compared with that of the joint specimen without filling materials. Cement material strength, prestress and additive admixture can affect the friction performance of the node to various degrees. When the cubic strength of the fine aggregate concrete increased from 30 MPa to 40 MPa, the friction performance at the joint interface increased by about 9.8%. When the prestress increased from 300 kN to 450 kN, the friction performance of the joint interface increased by around 55.1%. The expansion agent can also improve the friction performance of the

\* 收稿日期:2016-09-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51278488), National Natural Science Foundation of China(51278488);煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放课题项目(SKLCRSM14KFB05), Open Projects of State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining (SKLCRSM14KFB05);北京高等学校青年英才计划项目(YETP0942), Beijing Higher Education Young Elite Teacher Project(YETP0942)

作者简介:吴丽丽(1977—),女,江西南昌人,中国矿业大学(北京)副教授,博士生导师

† 通讯联系人, E-mail: jennywill@163.com

joint interface, but the effects are just a little.

**Key words:** integral prefabricated; slab-column joints; friction performance; prestressing; additive admixture

整体预应力装配式板柱结构起源于前南斯拉夫,简称 IMS 体系,它无梁无柱帽,以预制的板和柱作为基本构件,在层间施加双向预应力,使板和柱紧密贴合在一起,通过板柱界面间的摩擦力来提供竖向支撑力<sup>[1]</sup>。唐山地震以后,该结构体系开始传入中国,在中国陆续开展了一些研究工作,以北京中国建筑科学研究院为主,编制了 CECS 52:2010《整体预应力装配式板柱建筑技术规程》。

近年来国家大力倡导建筑工业化和住宅产业化,装配式混凝土结构已经是建筑工业化的一种重要形式<sup>[2]</sup>,这使得装配式混凝土结构成为当前研究热点,不断涌现装配式混凝土结构的新形式及建造新技术<sup>[3]</sup>。装配式板柱结构体系简单,抗震性能良好,成本低廉,耗能较少,可显著提高建筑结构的整体质量和工业化程度,提高劳动生产率,能够充分满足绿色建筑的要求<sup>[4]</sup>。该结构体系已成功地应用到商住楼<sup>[5]</sup>、民居、写字楼<sup>[6]</sup>等工程中。

在 20 世纪 80 年代初,国内一些学者开展了预应力板柱结构节点受力方式和传力特征的相关研究,陈惠玲等<sup>[7]</sup>开展了双向预应力板柱节点的低周反复抗弯性能与抗剪特性和卸除锚具的双向预应力板柱结构摩擦节点安全性的试验研究,建立了摩擦节点结合面的抗剪计算公式,李郢<sup>[8]</sup>对摩擦耗能体系预应力板柱结构进行了非线性地震反应分析,分析结果表明摩擦耗能体系预应力板柱结构是一种减震体系,板柱结构试验小组(中国建筑科学研究院抗震所)<sup>[9]</sup>进行了 1/3 比例空间结构模型在反复水平作用下的相关试验,试验研究表明板柱结构的抗震性能良好,可以满足一般地震的设防要求,并提出了抗震设计参数的建议和简化计算模型,王娟明等<sup>[10]</sup>从刚度、强度、延性和耗能等方面分析了摩擦节点的性能,阎兴华等<sup>[11]</sup>对节点的承载能力、延性、恢复力特性及受力机理等方面进行了实验分析,结果表明节点承载能力高,延性良好,可以满足抗震性能,马云昌等<sup>[12]</sup>对三个板柱边节点和三个板柱中节点的抗冲切性能进行了研究,指出板柱节点在不平衡弯矩和冲切力共同作用下的破坏形态为冲切弯曲复合破坏形态,段洪涛<sup>[13]</sup>通过试验发现板柱结构在受力变形过程中有较大的水平变位,板柱

结构的塑性耗能能力不佳,增加配筋率,会对板的延性有不利影响,但是能提高承载力,董挺峰等<sup>[14]</sup>对无粘结预应力装配式混凝土框架节点的破坏形态、能量耗散等性能进行了研究,结果表明无粘结预应力装配式混凝土框架节点具有的耗能能力不如整浇钢筋混凝土节点,但其变形恢复能力和延性比现浇混凝土好,陈理卿等<sup>[15]</sup>研究了预应力混凝土框架耗能能力等方面的影响,分析认为施加预应力可以增强节点区域的整体性,提高结构的耗能能力、延性、节点抗裂能力和极限承载力。

整体预应力板柱结构的传力方式与普通混凝土框架梁柱体系不同,其抗震工作机理也与一般框架不同,板柱结构不是依靠梁端形成塑性铰,而是直接通过预应力钢筋将楼板和柱子相互连接,在预制板柱之间形成摩擦节点,当地震作用较强烈时,预制柱与板会发生相对转动,使板柱节点接触界面发生不平衡接触,这种接触会使混凝土预制柱在节点处所受到的水平压力不在同一作用线上,即产生截面上的不平衡弯矩,板与柱间转角将随着结构位移的增大而增大,由此依靠缝间摩擦力做功消耗地震能量,当前对板柱间节点摩擦性能的深入研究尚不多见。

目前,我国现行的 CECS 52:2010《整体预应力装配式板柱结构技术规程》中提出了节点处力学计算方法和施工要求<sup>[16]</sup>。但对于预应力板柱结构节点构件连接处的混凝土界面影响因素研究不足,缺乏各因素相互间的微观协调传力机理,不能给出几种因素在不同构造措施下的统一设计计算方法。

中国建筑科学研究院曾进行了有关预应力板柱结构预应力摩擦构件和同类型钢筋混凝土试件抗剪性能的对比试验,提出了预应力板柱结构摩擦节点的抗剪性能与预制构件之间的砂浆粘结力、预应力大小以及应力筋的抗剪强度等因素的关系表达式,但是没有具体给出摩擦结合面灌缝砂浆或细石混凝土强度和外加剂对于摩擦因数的影响,易成等<sup>[17-18]</sup>开展了关于一体两介质模型抗剪性能研究和两介质接触面抗剪性能的影响研究,认为有必要充分考虑界面细石混凝土的材料性能对于板柱节点性能的影响。

与此同时,节点界面摩擦因数 $\mu$ 的取值尚有不同见解,混凝土面之间的摩擦因数可取0.72~0.80,现行CECS 52:2010《整体预应力装配式板柱结构技术规程》<sup>[16]</sup>中关于摩擦因数的取值规定板柱节点接缝接触面处的竖向抗剪承载力由预应力产生的摩擦力承担,当符合该规程<sup>[16]</sup>第5.1.1条规定时,可取0.7.

在北京原国家建委一局科研所完成的整体预应力装配式板柱结构的四柱一板静荷载试验中,验证了板四角为纯摩擦节点,得出破坏荷载约为原设计荷载的3.5倍<sup>[19]</sup>.同时又有学者得出,混凝土面之间摩擦因数可取0.6~0.8.摩擦因数 $\mu$ 对于光滑接触面取0.6,对于粗糙接触面取0.8.因此有必要针对节点接触面的模型系数的取值做进一步研究.

基于国内外关于板柱连接节点性能的相关研究成果,综合考虑实际工程中节点的构造特征和要求,本文设计制作了4组共6个板柱节点模型试件,试件的尺寸参考《整体预应力装配式板柱建筑的设计与施工》进行设计.由于试验条件限制,本文采用简化的板柱节点进行加载试验,分别考虑预应力大小、灌缝材料(本文采用细石混凝土)强度和外加剂(早强剂和膨胀剂)对板柱结构的节点界面摩擦性能的影响,6个试件中特别制作了一个节点接触界面处无灌缝材料的试件,以便与有灌缝材料的试件作对比.

## 1 节点摩擦性能试验设计

### 1.1 试件设计

如图1所示,整体预应力装配式板柱结构,以预制的板和柱作为基本构件,在层间施加双向预应力,使板和柱紧密贴合在一起,通过板柱界面间的摩擦力来提供竖向支撑力.该板柱节点的关键点有两个,一个是预制板安装就位,板角将柱四个面包围,留出穿筋的明槽,板和柱之间留缝,待此后填缝;二是穿筋施加预应力,板柱间紧密贴合,形成摩擦面.由此可见,该结构板柱节点形成的关键因素是预应力和板柱间侧面通过灌缝材料形成的摩擦面,而要获得摩擦面的摩擦性能可以通过在试验条件下模拟这种接触状态,实现两个关键因素.理想情况下是设计一个完整的四块板包围一根柱的节点模型,但限于现有试验条件,本文仅设计了一根柱和

单块板的简化模型(详见后文所述),板柱之间采用灌缝材料粘结,来近似模拟实际板柱的接触面灌缝情况.试验时把柱转动90度,在板端施加竖向压力模拟预应力(未穿预应力筋的主要原因是由于板、柱尺寸限制,未在板中穿预应力钢筋,以免构件长度太短引起预应力的损失严重),水平横推板件,来模拟板柱节点接缝接触面处的竖向抗剪承载力,从而获得板柱之间的摩擦性能.所设计的板和柱的尺寸、预应力大小均按照实际工程常用的尺寸,而且灌缝的材料等都是依照规范和北京中建建筑科学研究院曾经承建的实际工程案例进行考虑.虽然本文试验的简化模型不能完全再现实际结构,但是它基本模拟板柱节点的两个关键因素,所测数据结果能够在一定程度上反映节点的摩擦性能.

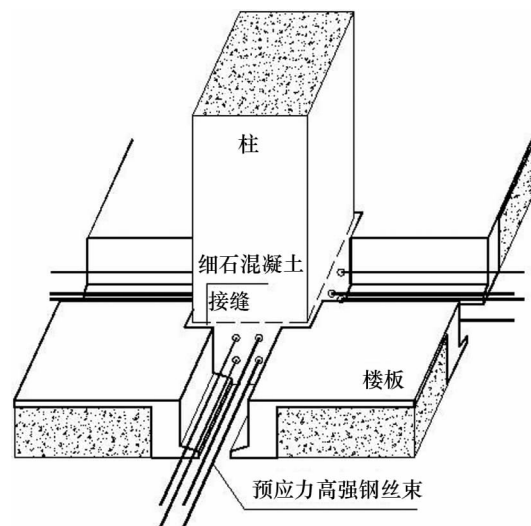


图1 预应力摩擦节点

Fig.1 Prestressed friction joint diagram

本文共设计了6个节点,试件设计方案见表1.采用单根柱和单块板作为节点连接试件,试件加工图如图2和图3所示.板端部施加压力来模拟实际的预应力,预应力的大小依据《整体预应力装配式板柱结构技术规程》<sup>[16]</sup>进行设计,并参考实际工程“天津市友谊路7层板柱-剪力墙结构住宅”,其楼层预应力的综合轴力在244~649 kN不等(利用CECS 52:2010,整体预应力装配式板柱结构技术规程公式(4.2.2),计算其预应力综合轴力),根据实际结构中板柱尺寸,选择相应合适的预应力大小,定出板端的轴向压力值.本文试验考虑预应力在300~500 kN之间,在试验前可以预估水平剪力不超过竖向轴力,手动千斤顶的最大承载力是50 kN.

表 1 试验试件设计参数

Tab.1 Design parameters of test specimens

组别	试件编号	预制板尺寸/ (mm×mm×mm)	预制柱尺寸/ (mm×mm×mm)	预应力/ kN	接缝处细石 混凝土强度	外加剂	
						早强剂	膨胀剂
1	PJ1	400×400×250	1 050×500×400	300	C40	✓	
	PJ3	400×400×250	1 050×500×400	400	C40	✓	
	PJ5	400×400×250	1 050×500×400	450	C40	✓	
2	PJ2	400×400×250	1 050×500×400	400	C30	✓	
	PJ3	400×400×250	1 050×500×400	400	C40	✓	
3	PJ3	400×400×250	1 050×500×400	400	C40	✓	
	PJ4	400×400×250	1 050×500×400	400	C40	✓	✓
4	PJ5	400×400×250	1 050×500×400	450	C40	✓	
	PJ6	400×400×250	1 050×500×400	450	无		

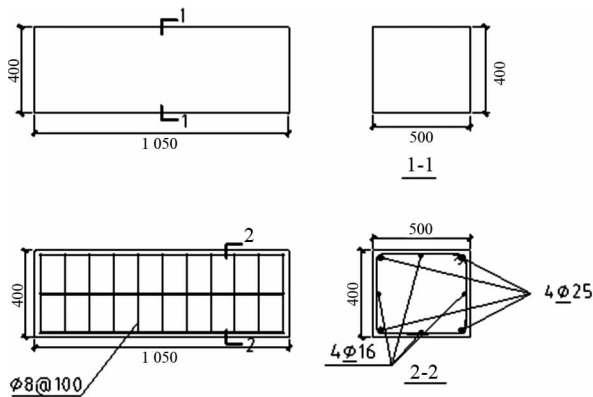


图 2 预制柱配筋图

Fig.2 Reinforcement layout of precast column

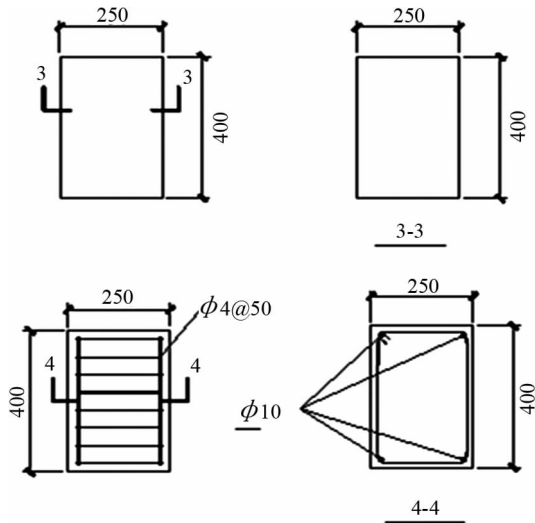


图 3 预制板配筋图

Fig.3 Reinforcement layout of precast slab

试验变化的参数主要为:预应力大小,细石混凝土强度和外加剂,以及考察板柱节点连接界面是否存在灌缝细石混凝土的影响.预制的混凝土板和柱通过接缝处浇筑细石混凝土粘结后形成板柱连接节点,其中板和柱的设计强度为 C40.柱尺寸为 1 050 mm×500 mm×400 mm,板尺寸为 400

×400 mm×250 mm,板和柱中的配筋均按照《整体预应力装配式板柱建筑的设计与施工》中进行设计配置.

板、柱试件浇筑完成后进行养护,待强度达到设计强度的 90%以后拆模,灌缝连接并再次进行养护,待细石混凝土达到预定强度后进行试验加载.其中细石混凝土强度等级和外加剂(包括早强剂和膨胀剂等)用量情况见表 2,由于场地和加载条件的限制,将柱和板旋转 90°后水平放置,灌缝连接完成后节点试件如图 4 所示.试验中,对板、柱混凝土构件和灌缝材料细石混凝土同时各制作了 3 块 150 mm×150 mm×150 mm 的混凝土立方体试块,并与试件在相同的环境下进行养护.在试件加载当天按照标准试验程序测试混凝土的抗压强度,测得其平均立方体抗压强度如表 3 所示.

表 2 灌缝细石混凝土配比表

Tab.2 Seaming fine stone concrete proportioning table

混凝土 序号	混凝土 强度	混凝土 用量/L	水泥 /kg	早强剂	膨胀剂 (4.2%)	砂/ kg	细石 /kg	水 /kg
1	C30	10	2.7	✓		8.4	10.5	1.85
2	C40	15	5.1	✓		13.5	16.5	2.3
3	C40	10	3.4	✓	0.142	9.0	11.0	1.6

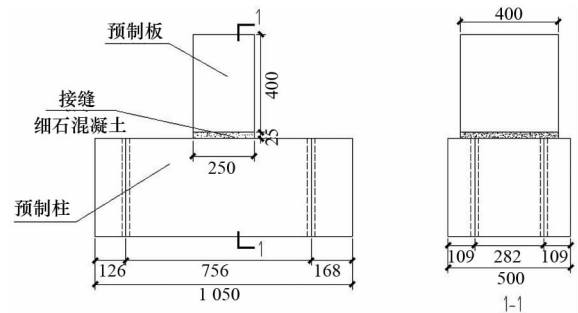


图 4 整体试件示意图

Fig.4 Schematic diagram of assembled specimen

表3 混凝土标准立方体抗压试验表

Tab.3 Standard cube compressive test of concrete

试件名称	表面积/ (mm×mm)	压力 /kN	抗压强度 /MPa	平均抗压强度 /MPa
预制板、 预制柱	150×150	530	23.6	27.7
		670	29.8	
		670	29.8	
C40 灌 缝细石 混凝土	100×100	370	37.0	38.3
		395	39.5	
		383	38.3	
C30 灌 缝细石 混凝土	100×100	320	32	33.0
		340	34	
		310	31	
C40 灌 缝细石 混凝土 (含膨胀剂)	100×100	400	40	37.7
		375	37.5	
		355	35.5	
C30 灌 缝细石 混凝土 (含膨胀剂)	100×100	278	27.8	28.9
		288	28.8	
		300	30.0	

1.2 试验装置及加载方案

1.2.1 试验装置

试验采用 100 t 电液伺服千斤顶提供竖向荷载,用于模拟挤紧板与柱之间的预应力,50 t 级手动千斤顶提供水平荷载,用于施加板的剪力作用,试验加载装置示意图见图 5。

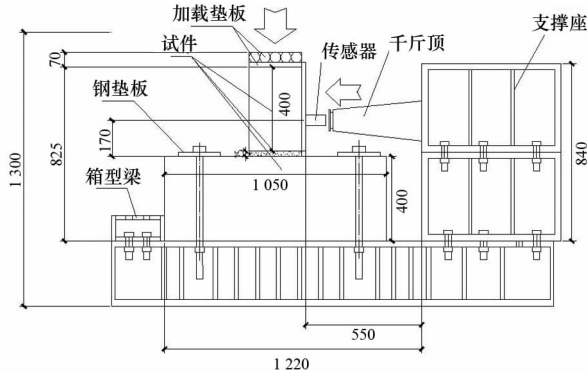


图5 试验加载装置

Fig.5 Test setup

由图 5 可知,首先在板端施加竖向力,用以模拟预应力,当“预应力”达到预定值时,停止加载,然后通过水平千斤顶手动逐级施加水平荷载,为了不在接缝处产生附加弯矩,水平千斤顶加载点尽量接近摩擦面,受试验条件限制,加载点位于距离摩擦面 170 mm 处。其中,箱型梁、支撑座和底座通过高强度螺栓连接,在水平方向上形成一个自平衡系统。在试件中预留孔洞,试验准备时将柱试件通过螺栓固定在底座上,防止水平加载时试件发生侧翻。板端加

载垫板中设置滚轴,可以减小作动器与板试件之间的摩擦力对试验的影响,使传感器测得的水平作用力更为精确,同时垫板也可以使荷载作用分配均匀,避免试件发生局部破坏。

水平力的施加根据板柱节点界面最大静摩擦力公式  $Q_m = \mu N_y$  (其中  $\mu$  为界面最大静摩擦因数,  $N_y$  为相应阶段有效预应力,  $Q_m$  为预应力产生的界面摩擦力)进行预估,在预估过程中  $\mu$  取 0.7,  $N_y$  最大值按表 1 进行选取。在水平荷载达到  $0.6Q_m$  之前加载速度相对较快,按照  $0.2Q_m$  的加载级别进行;当水平荷载达到预估值的  $0.6Q_m \sim 0.8Q_m$  时,按照  $0.1Q_m$  的加载级别进行加载;  $0.8Q_m$  以后则按照  $0.05Q_m$  的加载级别进行加载,直到节点界面发生相对滑移。

1.2.2 测点布置

试验为静力加载试验,导杆引伸仪和混凝土应变片的布置情况见图 6。在板、柱交界面处设置导杆引伸仪,获取板柱发生滑移时刻点及相对滑移,在板和柱的侧表面上共设置了 13 个混凝土应变片,监测试验过程中板顶竖向加载作用下板内的应变以及传递至柱身的应力变化情况。数据全部通过 TDS-530 静态应变采集系统自动记录。

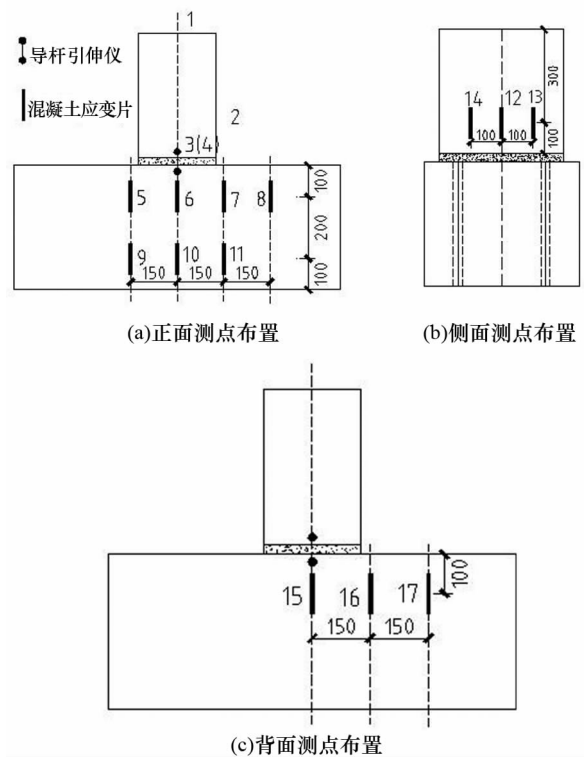


图6 测点布置图

Fig.6 Layout of measuring points

## 2 试验结果与分析

### 2.1 试验现象

混凝土预制板柱节点试件 PJ1~PJ6 的界面滑移总体可以分为 3 个阶段.加载初期(50%极限荷载  $P_u$  范围内,即  $P \leq 0.5P_u$  时),此时的水平荷载相对较小,混凝土预制板柱节点未出现明显的相对滑移;当水平荷载介于  $0.5P_u \sim 0.7P_u$  时,在混凝土预制板和柱的接缝处,细石混凝土浇筑缝的部位开始出现细微裂缝,并且混凝土预制板与柱的相对位移开始有微小的增加;当荷载继续增加达到  $0.9P_u$  左右时,混凝土预制板和柱中的细小裂缝逐渐增多,并且原有的细微裂缝的宽度逐渐加大,当水平荷载达到  $0.9P_u$  左右的某一数值时,混凝土预制板和柱的滑移量陡增,预制板与预制柱之间突然发生较大滑移,同时可以听见细石混凝土发生碎裂的声音,说明混凝土预制板柱连接界面发生破坏.试验中构件的典型裂缝发展情况如图 7 所示.由于水平千斤

顶加载处距离混凝土板柱交界面有一定距离,因此在界面处不仅存在剪力,而且还会产生一定的附加弯矩,导致整体试件有侧倾的趋势,但经计算表明这个附加弯矩产生的界面张开应力非常小,仅会增加界面张开的趋势,即偏心产生的附加弯矩对本文试件界面摩擦因数的计算影响很小(以最大水平推力 480 kN 为例,按照构件截面大小,可以很容易计算得到在此附加弯矩下载面的张开拉应力仅为 0.076 MPa).板柱灌缝细石混凝土张开的顺序是从右至左,即水平剪力在混凝土预制板上的传递方向,并且缝宽从右至左逐渐减小.试验中发现柱通过长锚栓杆锚固于钢箱梁支座时,由于锚栓杆的预紧力不够,随着水平力增加,构件在侧倾情况下产生撬力,导致竖向预压力有所增加,增加量一般为 30 kN 到 50 kN 不等,从而使得界面摩擦力有时会大于预先施加的预应力值,这种撬力导致附加给试件 PJ1 和试件 PJ2 的剪力和弯矩增大,在两种力作用下构件根部产生了几条斜裂缝.

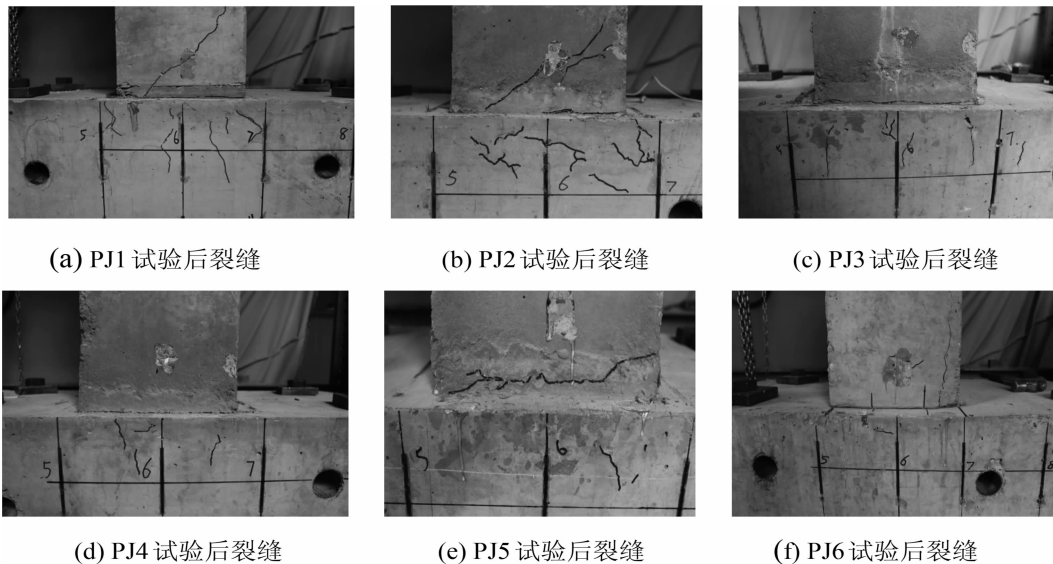


图 7 试件裂缝示意图

Fig.7 Diagram of specimen crack pattern

综合本文混凝土预制板柱节点试验的裂缝发展情况可以看出,当竖直方向作用力即预应力较大时,在加载过程中预制柱裂缝发展较为明显;当竖向作用力较小时,柱中裂缝发展不明显,且裂缝多为竖向裂缝,说明在加载过程中预制柱所受的竖向剪力对其影响显著.此外,当混凝土预制板柱节点发生明显破坏时,预制板与预制柱之间的灌浆细石混凝土均发生一定的破坏,板柱发生错动的界面多为细石混凝土与预制试件的接触面,但是也有试件出

现了预制板界面发生破坏和灌浆细石混凝土未发生破坏的现象,说明板柱节点发生剪切破坏的薄弱点位于混凝土预制板与预制柱的交界面和混凝土预制板的末端.

由于试验过程中采集的混凝土应变片数据数值一般很小,而且数据上下波动,对本文分析摩擦因数不产生直接影响,故下文略去这部分内容的描述.

### 2.2 荷载-滑移曲线

试验试件在整个试验过程中的荷载-板柱相对滑

移( $P-\delta$ )曲线如图8所示,其中纵坐标 $P$ 为千斤顶提供的水平荷载,横坐标 $\delta$ 为板与柱界面的相对滑移。

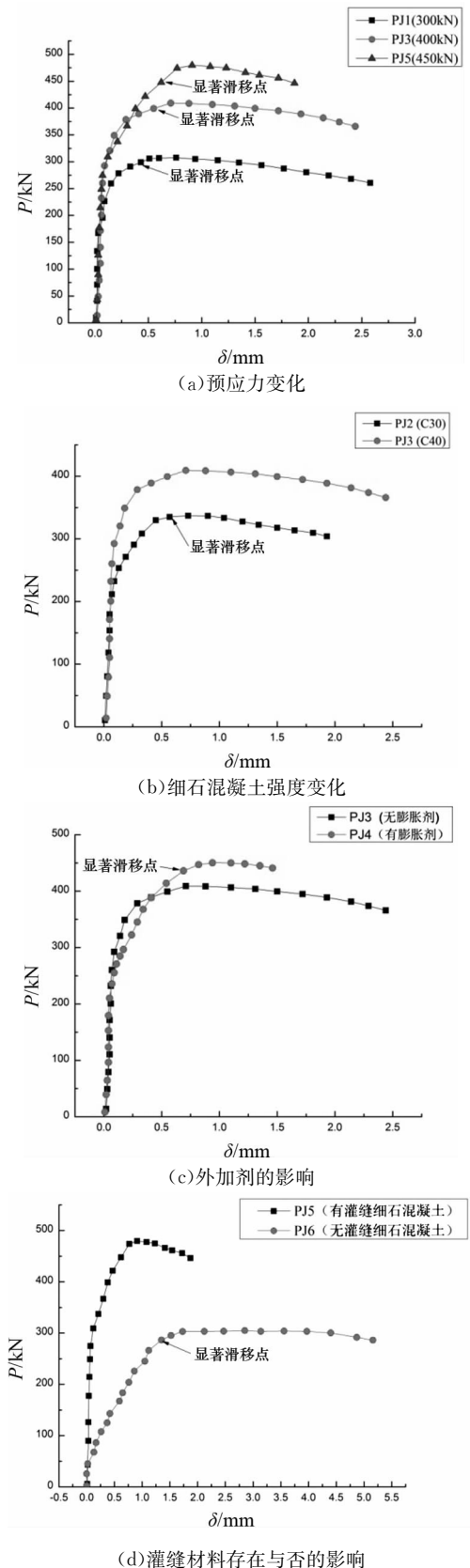


图8 试件的荷载-相对滑移( $P-\delta$ )曲线

Fig.8 Load-relative slip ( $P-\delta$ ) curve of specimens

从以上水平荷载-滑移曲线中可以看出:

1) 预应力对板柱节点摩擦性能的影响.如图8(a)所示.3个混凝土节点试件的接缝细石混凝土强度均为C40,均仅添加了早强剂,对应预应力分别为300,400和450 kN,对比PJ1,PJ3和PJ5三个试件可以看出,竖向预应力越大,板柱结构节点界面的摩擦力越大,但增幅变化不大,如PJ3比PJ1预应力增加100 kN,摩擦力增幅为34.5%;例如PJ5比PJ3预应力增量为50 kN时,摩擦力增幅为17.4%;当预应力从300 kN增加到450 kN时,摩擦力增幅为55.1%。

2) 不同接缝处细石混凝土强度等级对摩擦节点摩擦性能的影响见图8(b).对比组为PJ2和PJ3的竖向模拟预压力均为400 kN,接缝处细石混凝土均仅添加早强剂,接缝处细石混凝土强度分别为C30和C40.从图中可以看出,水平荷载-滑移曲线的基本形式与第一个对比组(图8(a))类似,接缝处细石混凝土的强度对混凝土摩擦节点的影响比较明显,细石混凝土强度越大,开始发生相对滑移时对应的水平荷载越大,节点的摩擦性能越好,其摩擦力提高约9.8%。

3) 外加剂(早强剂、膨胀剂)对于预应力摩擦节点承载力的影响如图8(c)所示.对比组PJ3和PJ4试件的竖向模拟预压力均为400 kN,接缝处细石混凝土强度均为C40,PJ3仅添加早强剂,PJ4除早强剂外还添加了膨胀剂.从图中可以看出,添加了两种外加剂的试件PJ4的节点摩擦力比没有添加膨胀剂的试件PJ3有所增大,但是对于界面摩擦性能的提高不显著,本试验中摩擦力仅提高3.3%。

4) 灌缝材料存在与否对节点摩擦性能的影响如图8(d)所示.选择了PJ5和PJ6作为对比组.两试件的竖向模拟预压力均为450 kN,但是PJ5接缝处填有强度为C40的细石混凝土,并添加了早强剂,而PJ6为干拼接缝,混凝土预制板和柱直接接触连接.从图中可以看出,当混凝土预制构件接缝处为干拼即不添加任何灌缝材料的情况下,水平荷载很小(图中仅为 $0.17P_u$ )时,混凝土板柱节点界面处就开始出现相对水平滑移,节点所能承受的摩擦力显著降低,与其他有灌缝细石混凝土的试件的水平滑移呈现瞬间增大的特点截然不同,这表明若不添加任何界面粘结材料时,混凝土预制板柱节点的摩擦性能较差,本试验中前者界面摩擦力仅为灌缝节点试件的70%。

根据摩擦力计算公式 $\mu = Q_m/N_y$ 计算相应试

件的最大静摩擦因数,本文选取混凝土板柱节点发生显著滑移时刻数据进行分析,所谓的显著滑移时刻主要指构件力-滑移曲线上力增量很小,但滑移量显著增加的时刻刻点,每个试件的显著滑移点是不一样的,6个试件的显著滑移时刻对应的滑移值增量分别为:30.3%,26.77%,34.15%,27.78%,31.19%和20.53%。由此得到各个试件发生滑移的水平推力,用发生显著滑移时刻前后的水平推力除以相应的竖直预应力进行计算分析,得到相应试件的摩擦因数。

6个预应力板柱节点试件的最大静摩擦因数如表4所示。本文的试验结果除了接缝处未浇筑细石混凝土的试件PJ6( $\mu=0.64$ )外,其余试件的最大静摩擦因数均在0.85以上,远大于《整体装配式板柱结构技术规程》中所规定的 $\mu=0.7$ 。这表明预应力板柱节点处界面摩擦性能较好,现行规程CECS 52:2010建议的摩擦因数具有较高的安全储备。

表 4 各试件最大静摩擦因数

Tab.4 Maximum static friction coefficient of specimens

组别	试件编号	最大静摩擦因数
1	PJ1	0.88
	PJ3	0.90
	PJ5	0.91
2	PJ2	0.82
	PJ3	0.90
3	PJ3	0.90
	PJ4	0.93
4	PJ5	0.91
	PJ6	0.64

### 3 结 论

本文通过对4组6个预应力板柱摩擦节点的试验研究,得出以下结论:

1)在预应力板柱节点承载力范围内,增大预应力可以有效提高节点的摩擦性能。

2)预应力节点接缝处细石混凝土的存在对于节点的摩擦性能十分重要,接缝处浇筑有细石混凝土的节点性能要优于没有浇筑细石混凝土的节点试件,并且提高细石混凝土强度也会相应提高节点的摩擦性能。

3)接缝处细石混凝土添加膨胀剂后,对增强预应力节点的摩擦性能有一定作用,尽管作用不明显,但是可以提高细石混凝土接缝的抗裂防水能

力,建议在工程中适量添加。

4)试验证明当接缝处浇筑细石混凝土时,截面最大静摩擦因数均在0.85以上,这表明现行《整体装配式板柱结构技术规程》中提到的节点摩擦因数 $\mu=0.7$ 具有较高的安全储备。今后仍需深入开展节点界面摩擦动力性能的相关试验研究,为相关规范的完善和修订提供参考依据。

### 参考文献

- [1] 李晨光,刘航,高鸿升,等.新IMS整体预应力装配式板柱体系试验和工程实践[J].建筑技术,2000,31(12):838-839.  
LI Chenguang, LIU Hang, GAO Hongsheng, et al. Experiment and practice of new IMS system of prefabricated prestressed concrete slab column structure[J]. Architecture Technology, 2000, 31(12): 838-839. (In Chinese)
- [2] 朱张峰,郭正兴,汤磊,等.考虑不同预拉力的新型混合装配式混凝土剪力墙抗震性能试验[J].湖南大学学报:自然科学版,2015,42(11):41-48.  
ZHU Zhangfeng, GUO Zhengxing, TANG Lei, et al. Seismic performance experiments on new hybrid precast concrete shear walls under different prestress forces[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2015, 42(11): 41-48. (In Chinese)
- [3] 肖全东,郭正兴.预制混凝土双板剪力墙的耗能能力[J].湖南大学学报:自然科学版,2014,41(9):35-41.  
XIAO Quandong, GUO Zhengxing. Energy dissipation of double-wall precast concrete shear walls[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2014, 41(9): 35-41. (In Chinese)
- [4] 郑文忠,曹大富,吕志涛.装配整体预应力板柱结构IMS体系综述[J].江苏建筑,1994(3):41-44.  
ZHENG Wenzhong, CAO Dafu, LÜ Zhitao. Summary of IMS system for assembly of monolithic prestressed slab column structure[J]. Jiangsu Construction, 1994(3): 41-44. (In Chinese)
- [5] 万心一.整体预应力板柱结构住宅施工[J].建筑技术,1981(1):2-9.  
WAN Xinyi. Overall prestressed slab column structure housing construction [J]. Architecture Technology, 1981(1): 2-9. (In Chinese)
- [6] 邓婴垣,李锦添,丁泽龙,等.整体预应力板柱住宅[J].建筑学报,1981(11):76-77.  
DENG Yinyuan, LI Jintian, DIN Zhelong, et al. Whole prestressed slab column house [J]. Architectural Journal, 1981(11): 76-77. (In Chinese)
- [7] 陈惠玲,刘鸿琪,张忠利.预制预应力摩擦节点的受力特性与安全性[J].工业建筑,1984(6):28-33.  
CHEN Huiling, LIU Hongqi, ZHANG Zhongli. Mechanical properties and safety of precast prestressed friction joints[J]. Industrial Construction, 1984(6): 28-33. (In Chinese)
- [8] 李郢.摩擦耗能体系预应力板柱结构[J].工业建筑,1984(4):



- 23—30.
- LI Ying. Friction energy dissipation system prestressed slab column structure[J]. *Industrial Construction*, 1984(4): 23—30. (In Chinese)
- [9] 板柱结构试验小组, 中国建筑科学研究院抗震所. 剪力墙-整体预应力板柱结构抗震性能的试验研究[J]. *建筑科学*, 1986(3): 3—9.
- Test Group of Column-slab Structures, China Academy of Building Researach. A seismic experiment. of the piestressing columnslab struct ures with shearwalls[J]. *Building Science*, 1986(3): 3—9. (In Chinese)
- [10] 王娟明, 沈聚敏, 阎兴华. 预应力装配整体式板柱结构抗震性能的试验研究[J]. *土木工程学报*, 1988, 21(3): 24—36.
- WANG Xianming, SHEN Jumin, YAN Xinghua. Experimental research on aseismic behaviour of slab column structural system assembled by presterssing[J]. *China Civil Engineering Journal*, 1988, 21(3): 24—36. (In Chinese)
- [11] 阎兴华, 浦见恕, 王娟明. 预应力装配式板柱节点试验与承载能力计算[J]. *北京建筑工程学院学报*, 1991(1): 47—56.
- YAN Xinghua, PU Jiانشu, WANG Xianmin. Experment reseach and load capacity calculation of the prestressed slab column joints[J]. *Journal of Beijing University of Civil Engineering and Architecture*, 1991(1): 47—56. (In Chinese)
- [12] 马云昌, 吕西林. 钢筋混凝土板柱节点的抗震性能研究[J]. *建筑结构学报*, 2001, 2(4): 49—54.
- MA Yunchang, LÜ Xilin. Seismic behavior of reinforced concrete slab column system[J]. *Journal of Building Structures*, 2001, 2(4): 49—54. (In Chinese)
- [13] 段洪涛. 钢筋混凝土板柱节点抗震性能的试验研究[D]. 重庆: 重庆大学土木工程学院, 2004: 68—87
- DUAN Hongtao. Experimental research of seismic behavior of slab column connections[D]. Chongqing: College of Civil Engineering, Chongqing University, 2004: 68—87. (In Chinese)
- [14] 董挺峰, 李振宝, 周锡元, 等. 无黏结预应力装配式框架内节点抗震性能研究[J]. *北京工业大学学报*, 2006, 32(2): 144—148.
- DONG Tingfeng, LI Zhenbao, ZHOU Xiyuan, *et al.* Experimental study on seismic performances of precast prestressed concrete beam to column connections with unbonded tendon [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2006, 32(2): 144—148. (In Chinese)
- [15] 陈理卿, 黄慎江. 装配式预应力混凝土框架节点抗震性能的探讨[J]. *工程与建设*, 2008, 22(6): 808—810.
- CHEN Liqing, HUANG Shenjiang. Study on seismic performance of prec- ast prestressed concrete frame joints[J]. *Engineering and Construction*, 2008, 22(6): 808—810. (In Chinese)
- [16] CECS 52:2010 整体预应力装配式板柱结构技术规程[S]. 北京: 中国计划出版社, 2010: 15—28.
- CECS 52:2010 Technical code for columnslab buliding assembled by monolithic prestressing [S]. Beijing : China Planning Press, 2010: 15—28. (In Chinese)
- [17] 易成, 郝彬, 朱红光, 等. 裂隙岩体的一体两介质模型抗剪性能研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(6): 1207—1215.
- YI Cheng, HAO Bing, ZHU Hongguang, *et al.* Experimental investigation on shear performance of unibody bimaterial mechanical model for fissured rocks[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(6): 1207—1215. (In Chinese)
- [18] 易成, 朱红光, 王洪涛, 等. 强度差异对两介质接触面抗剪性能的影响[J]. *煤炭学报*, 2012, 37(9): 1516—1521.
- YI Cheng, ZHU Hongguang, WANG Hongtao, *et al.* Effect of strength difference on shear behaviors of bimaterial interface [J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(9): 1516—1521. (In Chinese)
- [19] 王晓茜. 预压装配式预应力混凝土框架竖向荷载作用下的整体性分析[D]. 合肥: 合肥工业大学土木与水利工程学院, 2004: 35—40.
- WANG Xiaohan. Analysis of the behaviour of sub assemblage and prestressed concrete frames under vertical loads [D]. Hefei: School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, 2004: 35—40. (In Chinese)