

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.06.010

混凝土空心楼盖板柱增强节点抗震性能试验研究*

庞 瑞¹, 王 璐¹, 倪红梅², 刘 瑞³, 党隆基⁴, 梁书亭⁴

(1. 河南工业大学土木工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南城建学院, 河南 平顶山 467036; 3. 河南省城乡规划设计研究总院, 河南 郑州 450044; 4. 东南大学土木工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 为研究空心楼盖板柱增强节点的抗震性能, 进行了3个板柱节点在低周往复荷载作用下的拟静力试验, 对节点的承载能力、开裂模式、破坏形态、滞回曲线、位移延性、刚度退化和耗能能力等进行了较为系统的研究。结果表明: 平行布管方式下空心板柱节点的承载力、刚度、耗能能力和刚度退化等抗震性能指标均优于正交布管方式布管下的板柱节点; 配置型钢剪力架能显著提高空心楼盖板柱节点承载力与抗震性能, 配置弯起钢筋对节点抗震性能提高的作用不明显。建议工程应用时综合考虑空心楼盖板柱节点的抗冲切与抗震需求来选择增强元件, 同时根据建筑平面布局和抗侧力结构布置等情况, 合理选择空心芯管的布置方向, 以提高结构整体抗震性能。研究成果可为采用空心管(或柱状芯材)的空心楼盖板柱结构的研究和应用提供参考。

关键词: 空心楼盖; 板柱增强节点; 布管方式; 抗震性能; 试验研究

中图分类号: TU375.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)06-0919-10

Experimental Study on the Seismic Behavior of Strengthened RC Slab-column Connections in Flate Plate Structures

PANG Rui¹, WANG Lu¹, NI Hongmei², LIU Rui³, DANG Longji⁴, LIANG Shuting⁴

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan University of Urban Construction, Pingdingshan 467036, China; 3. Henan Urban & Rural Planning and Design Institute, Zhengzhou 450044, China; 4. College of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: An experimental program consisting of prototype tests on selected slab-column connections was conducted to evaluate the seismic behavior of the proposed slab-column connections in hollow floor flat slab column structure. Performance of the test specimens was evaluated in terms of bearing capacity, crack and failure mode, hysteretic curves, ductility, energy dissipation capacity and stiffness degradation. The test results review that the seismic behavior of the column with parallel arranged hollow tubular was better than that of the column with orthogonal arranged hollow tubular; the behavior of slab-column connections strengthened by section steel cross bridging was better than that of connects strengthened by bend-up bars. It is proposed that the demand of seismic behavior and punching

* 收稿日期: 2019-06-13; 修回日期: 2020-04-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51778214)、中原青年拔尖人才支持项目(ZYQR201912170)、河南省科技攻关项目(152102210066)、河南省高等学校重点科研项目(17A560003)资助

作者简介: 庞 瑞(1981-), 男, 副教授, 博士。主要从事混凝土结构、工程结构抗震与防灾研究。Email: pangrui@haut.edu.cn

shear behavior should be considered simultaneously at the project design stage. Furthermore, the hollow tubular rational distribution should be determined considering the layout of the building structure and the arrangement of the lateral force resistant system.

Keywords: hollow core floor; strengthened slab-column connections; hollow tubular distribution; seismic behavior; experimental study

引 言

板柱结构具有结构形式简单,传力直接、楼层净空大、施工速度快、管道穿行方便和造价低等优点,在国内外工业与民用建筑中得到广泛应用^[1]。空心楼盖在保持楼盖的大部分承载能力与刚度的情况下,能减轻楼盖自重,节约材料,符合低碳建筑的发展理念,主要应用于大跨度和大荷载的多层与高层建筑。空心楼盖板柱结构是空心楼盖与板柱结构相结合的产物,很好地发挥了板柱结构和空心楼盖的优点,应用前景广阔。

在竖向荷载和地震作用下,楼板中负弯矩和剪力的分布向柱端集中,形成高正应力和高剪应力的岛状区域。板柱节点抗震性能不如梁柱节点,在强地震作用下,是该体系的薄弱环节,板柱节点的抗震性能制约着整个结构的抗震能力。1985年墨西哥地震^[2]和1994年美国Northridge地震^[3]等地震中都有板柱结构破坏甚至倒塌,其中1985年墨西哥地震的板柱结构震害尤为突出,有91幢板柱结构遭受不同程度的破坏。在2017年墨西哥地震中又有27栋板柱结构房屋倒塌^[4],占倒塌房屋数量的61%。这些现象凸显了重新审视并持续深入研究板柱结构抗震与抗冲切机理的必要性。

在没有抗冲切配筋的板柱节点方面,国内外学者研究表明^[5-8],重剪比(重力荷载产生的剪力与节点抗冲切承载力之比)、柱截面尺寸、板厚、板配筋率、混凝土强度、水平荷载类型等都对板柱结构的承载力、刚度和破坏形态有重要影响。为提升板柱节点的抗震性能,常采用配置抗冲切元件和设置柱帽等措施。研究表明^[9-12],设置弯起钢筋、抗剪栓钉和型钢剪力架等均对提升板柱节点的抗冲切强度和延性有积极贡献,可防止或延缓冲切破坏的发生。研究发现^[13],设置柱帽或托板可降低发生冲切破坏的风险,但未必能显著提高板柱节点的抗震性能,现有研究成果主要集中在平板板柱节点,对带柱帽的节点的抗震性能研究还比较少。近20年来,

在板柱结构抗震性能方面,国内外学者在单榀板柱结构拟静力试验、板柱-剪力墙结构振动台试验和抗震性能评估方法等方面的大量研究表明^[14-22],有了抗震墙和良好的抗冲切措施,板柱结构的抗震性能可大幅提升,甚至可达到接近于框架-剪力墙结构的效果。2010版《建筑结构抗震设计规范》^[24]将板柱-抗震墙结构的最大适用高度相比2001版抗震规范分别提高了35 m(7度区)和25 m(8度区)。

国内外学者^[22,24]对于板柱结构抗震性能的研究多集中在实心节点板柱结构,虽有空心楼盖板柱结构的研究和应用,但多集中在薄壁方箱或轻质块体空心楼盖板柱结构,对芯管空心楼盖板柱节点抗震性能的研究少有报导。对同时考虑板柱节点增强元件、布管方式、暗梁和局部实心的空心楼盖板柱节点抗震性能研究更为少见。本文以空心板柱增强节点为研究对象,进行了考虑节点局部实心、暗梁、布管方式和配置抗冲切元件的空心板柱节点低周反复荷载试验,对节点的承载能力、破坏形态、刚度退化和耗能能力等进行了系统研究,以为空心楼盖板柱结构的研究和应用提供试验基础和有益参考。

1 试验设计

1.1 试件设计

现有标准对于板柱结构规定有:抗震设计时,框架-板柱组合结构应沿纵横柱轴线在板内设置暗梁,暗梁宽度可取与柱宽度相同或柱宽加上柱宽度以外各1.5倍板厚^[25];抗震设计时,无柱帽平板宜在柱上板带中设构造暗梁,暗梁宽度可取柱宽加柱两侧各不大于1.5倍板厚^[26];对于无梁的板柱结构,应在柱周围设置实心区域,柱周围的楼板实心部分宜在冲切破坏椎体底面线以外且不宜小于 $(h_0/2+100\text{ mm})$ 。抗震设计时,柱支承板楼盖,应在柱上板带中柱(柱帽)两侧各 h_c (h_c 取托板与楼板厚度之和)范围内布置暗梁^[27]。

本文设计了3个现浇空心楼盖板柱结构中节点

试件,对试件进行了低周往复荷载下的拟静力试验。板几何尺寸为 2 400 mm×1 400 mm×140 mm,柱截面尺寸为 300 mm×300 mm,柱高为 1 540 mm。试件构造如图 1 所示。

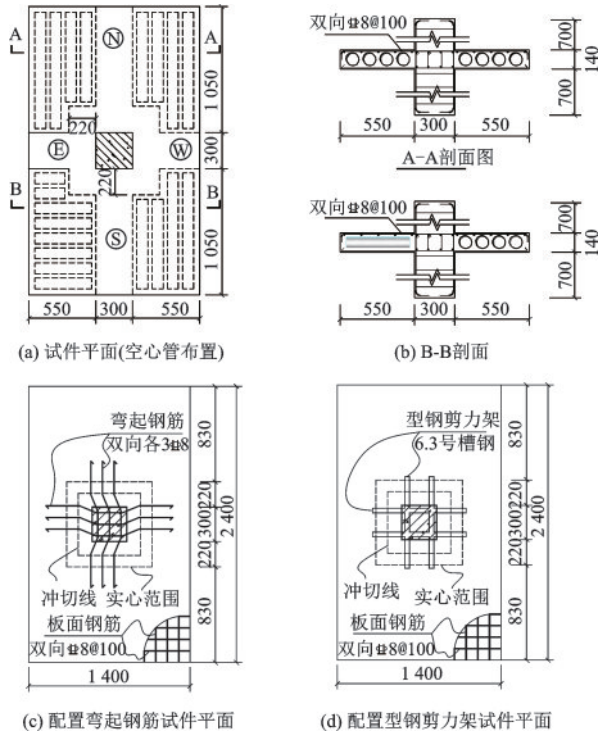


图 1 试件构造

与弯矩作用平面内暗梁相平行的布管方式为平行布管方式,简称 P 向;与弯矩作用平面内暗梁一侧相平行,另一侧相垂直的布管方式为正交布管方式,简称 Z 向。B1 为基本试件,B2 为配置弯起钢筋试件,B3 为配置型钢剪力架试件。暗梁箍筋采用 $\Phi 6@50/100(4)$;柱纵筋为 $8\Phi 16$,箍筋为 $\Phi 8@100$ 。试件构造和配筋见表 1。

试件钢筋均采用 HRB400 级钢筋,型钢剪力架由 6.3 号槽钢焊接而成,并按规范布置抗剪栓钉。

表 1 试件基本参数

Table 1 Specimen basic parameters

编号	布管方式	增强元件	规格
B1P	与板长边平行	—	—
B1Z	与板长边正交	—	—
B2P	与板长边平行	弯起钢筋	3 $\Phi 8$
B2Z	与板长边正交	弯起钢筋	3 $\Phi 8$
B3P	与板长边平行	型钢剪力架	6.3 号
B3Z	与板长边正交	型钢剪力架	6.3 号

混凝土设计强度等级为 C30。钢筋(板)和混凝土实测力学性能详见表 2 和表 3。

表 2 钢筋(板)实测力学性能

Table 2 Properties of reinforcing bars and steel plates

试样规格	屈服强度 f_y /Mpa	极限强度 f_u /Mpa	屈服应变 $\epsilon/\mu\epsilon$	伸长率 $\delta/\%$
$\Phi 6$	530.00	656.67	2 650.00	16.32
$\Phi 8$	535.00	666.67	2 675.00	19.60
$\Phi 16$	463.33	643.33	2 316.67	17.27
Q235B	296.67	355.00	1 483.33	28.34

表 3 混凝土实测力学性能

Table 3 Material properties of concrete

试件编号	$f_{cu,k}$ /MPa	f_c /MPa	f_t /MPa	E_c /Mpa
B1P、B1Z	31.48	20.39	2.06	30 282
B2P、B2Z	30.76	20.57	2.03	30 047
B2P、B2Z	31.29	22.10	2.05	30 221

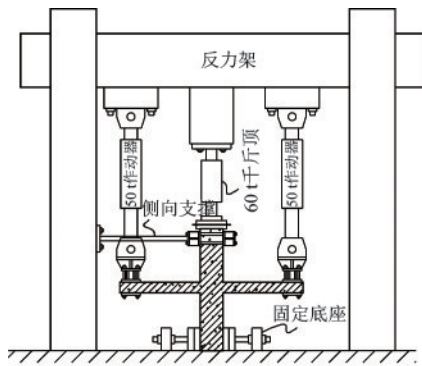
1.2 加载方案

试件柱底固定于实验室刚性地面,模拟铰接连接;柱顶采用人字形支撑与反力架相连,限制试件侧移。采用 60 t 千斤顶对板柱节点施加轴力 250 kN($\mu_N=0.13$),在千斤顶端部加垫聚四氟乙烯板。采用 50 t 作动器按相反方向对板柱节点两侧板端施加低周反复荷载。试验加载装置如图 2 所示。

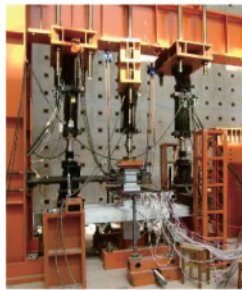
按照《建筑抗震试验规程》^[28]中规定的标准加载方法,采用荷载一位移混合控制进行加载。加载前进行预加载,并检测仪器仪表的工作状态。试件屈服前以荷载控制并分级加载;试件屈服后采用位移控制,位移值取试件屈服时的位移,并以该位移的整数倍为级差进行加载;屈服前每级荷载下循环 1 次,屈服后每级位移下循环 3 次;荷载下降到峰值荷载的 85% 时,试件破坏。加载制度如图 3 所示。采用南北两侧同时加载的方式对试件进行加载,根据南北两侧布管方式预估其屈服荷载,从而确定荷载控制加载时每级荷载的大小;而后根据南北两侧钢筋(型钢)屈服时刻,确定屈服位移。

1.3 测点布置与测试内容

在加载梁上部梁端各设置两个位移计,通过采集系统记录板端位移,并与 MTS 测得的位移进行对比。在左、右两侧,分别沿垂直板面方向和平行



(a) 加载装置示意



(b) 加载装置现场图

图2 加载装置

Fig.2 Test setup

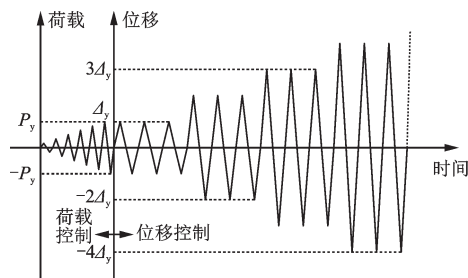


图3 加载制度

Fig.3 Loading history

板面方向架设位移计,测量板柱间转角。板顶、板底及柱纵筋和型钢腹板上均布置应变片,以测量钢筋和型钢应变。

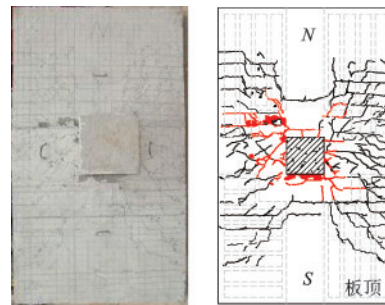
2 试验结果分析

2.1 试验破坏过程与形态

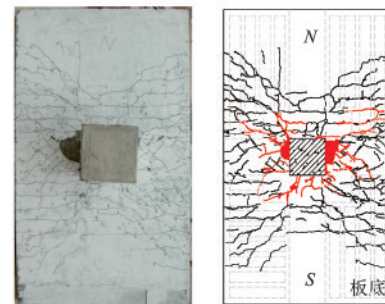
试件破坏全过程可分为3个阶段:未裂阶段、裂缝阶段和破坏阶段。为了描述方便,6个试件试验过程中平行布管方式均位于北侧,即板上标注的N侧;正交布管方式均位于南侧,即板上标注的S侧。试件裂缝分布如图4~6所示。

图4为试件B1板顶和板底裂缝分布。当北侧

加载至18 kN、南侧加载至13.6 kN时,板顶和板底在柱边缘出现平行板短边方向裂缝。当北侧加载至36 kN,南侧加载至27 kN时,南北侧板内纵筋屈服,改为位移加载。当北侧加载至57.8 mm时,达到峰值荷载63.6 kN。当南侧位移加载至31.6 mm时,达到峰值荷载43.8 kN,此后节点承载力开始下降,南侧(正交布管)荷载下降速率比北侧(平行布管)快。当北侧加载至87 mm,南侧位移加载至63 mm时,板柱节点区混凝土被压碎,柱边西侧板底和东侧板底混凝土脱落,试件承载力下降至峰值荷载的85%以下,试件破坏。



(a) 板顶裂缝分布

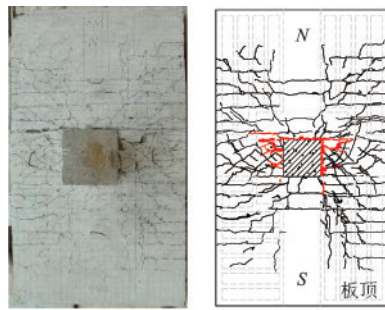


(b) 板底裂缝分布

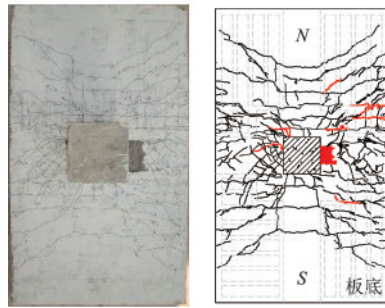
图4 试件B1裂缝分布

Fig.4 Crack distribution of B1

图5为试件B2板顶和板底裂缝分布。当北侧加载至17.6 kN时,板顶和板底在柱边出现平行板短边方向的裂缝。当南侧加载至13.2 kN时,板底柱边出现裂缝,加载至19.8 kN时,板顶出现斜裂缝。当北侧加载至44 kN,南侧加载至33 kN时,板顶钢筋屈服,由力加载改为位移加载。当北侧位移加载至40 mm时,达到峰值荷载72.2 kN。当南侧位移加载至36 mm时,达到峰值荷载46.9 kN,此后节点承载力开始下降,南侧(正交布管)荷载下降速率比北侧(平行布管)快。当北侧位移加载至80 mm时,板底西侧混凝土开始小块脱落。南侧位移加载至48 mm时,东南方向板顶混凝土出现小块



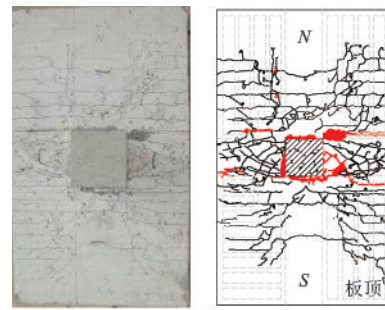
(a) 板顶裂缝分布



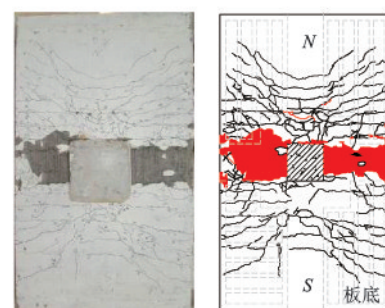
(b) 板底裂缝分布

图5 试件B2裂缝分布

Fig.5 Crack distribution of B2



(a) 板顶裂缝分布



(b) 板底裂缝分布

图6 试件B3裂缝分布

Fig.6 Crack distribution of B3

脱落。当北面和南面位移分别加载至100、60 mm时,试件承载力下降至最大荷载85%以下,试件破坏。

图6为试件B3板顶和板底裂缝分布。当北侧加载至22.4 kN,南侧加载至19.2 kN时,板顶和板底在柱边均出现平行板短边方向的裂缝。当北侧加载至56 kN,南侧加载至48 kN时,南北板面钢筋屈服,由力加载改为位移加载。当北侧位移加载至75 mm时,达到峰值荷载83.6 kN,经测量在板顶型钢剪力架端部板面出现宽约2 mm裂缝。当南侧位移加载至34 mm时,达到峰值荷载61.6 kN,此后节点承载力开始下降,南侧(正交布管)荷载下降速率比北侧(平行布管)快。当北侧加载至100 mm,南侧加载至68 mm时,板底东西两侧混凝土出现大块剥落,南侧荷载下降较快。当北侧位移加载至125 mm时,试件承载力下降至最大荷载85%以下,试件破坏。

从试件的裂缝分布可知:①从总体上看,南北两侧板面裂缝均呈现“V”字形向板端方向延伸,由于管状空心削弱了截面的抗弯刚度,在试件长度方向板柱节点外侧,空心板上方裂缝比暗梁区域多、分布范围广,裂缝发展速率快。②试件B2与基本试件B1裂缝分布比较接近,而试件B3与B1间有较大差异,表现在主裂缝外移,节点区破坏严重。③北

侧暗梁两边出现基本对称的平行短边方向的裂缝,在南侧,西南方向由于空心管与弯矩作用平面垂直布置,裂缝方向基本呈45°方向发展;而东南侧裂缝与北侧裂缝分布相似,但受西南侧影响主裂缝也发生了倾斜。

2.2 滞回曲线

图7为试件在低周往复荷载作用下的滞回曲线。

从图7(a)~(c)可知:平行布管试件滞回曲线呈现梭形,正交布管方式滞回曲线呈现反S形,说明平行布管试件耗能能力比正交布管试件耗能能力好;平行布管方式板柱节点的承载力、刚度也明显大于正交布管方式。当荷载达到峰值之后,正交布管方式承载力下降较快,平行布管方式承载力下降缓慢。综上,平行布管的板柱节点抗震性能好于正交布管方式。

由图7(d)、(g)可知,配置弯起钢筋对空心楼盖板柱节点的承载力和耗能能力提高作用有限;由图7(e)、(h)、(f)、(i)对比可知,配置型钢剪力架对空心楼盖板柱节点的承载力和耗能能力提高作用较为明显。因此,与弯起钢筋相比,采用型钢剪力架是提高空心楼盖板柱节点抗震性能的有效措施。

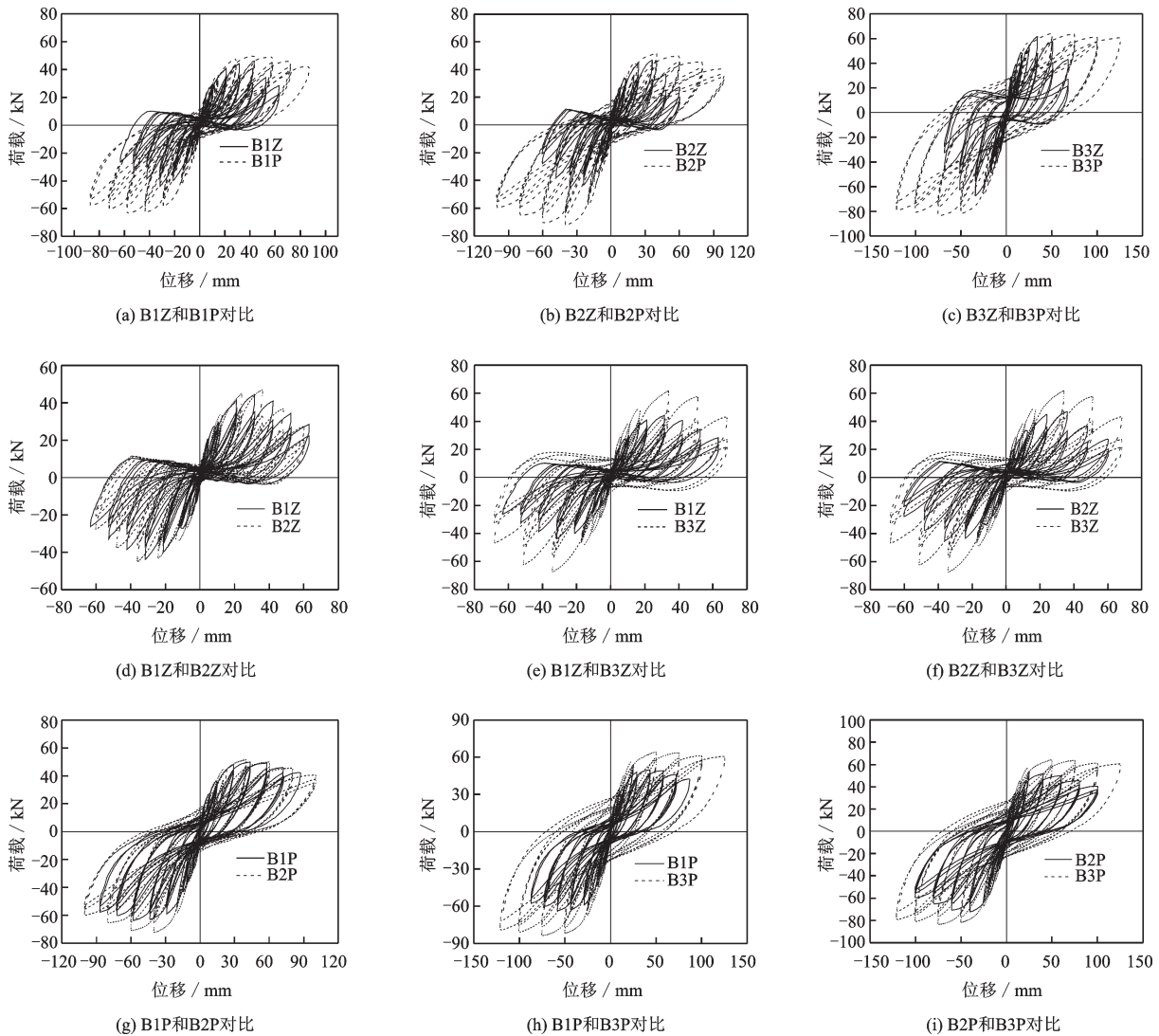


图7 滞回曲线

Fig.7 Hysteretic curves of specimens

2.3 骨架曲线

试件在低周反复荷载作用下的骨架曲线如图8所示。由图8(a)~(c)可知,平行布管方式板柱节点的开裂荷载、屈服荷载、峰值荷载和极限荷载大于正交布管方式的板柱节点,前者刚度也比后者大。当试件达到峰值荷载后,平行布管方式板柱节点承载力、刚度比正交布管方式下降缓慢。由图8(d)、(e)可知,试件B1Z和试件B2Z、试件B1P和试件B2P的承载力、刚度相差较小,说明配置弯起筋对提高板柱节点承载力和刚度的作用有限。可见,试件B3Z和试件B3P的承载力、刚度均明显比B1Z和B2Z好,说明配置型钢剪力架可显著提高板柱节点的承载力和刚度。

2.4 延性性能

极限位移 Δ_u 和屈服位移 Δ_y 之比称为位移延性系数,即 $\mu=\Delta_u/\Delta_y$ 。各节点的荷载特征值和延性系数见表4。由表4可知:(1)平行布管方式的板柱节点延性系数总体上大于正交布管方式的板柱节点;(2)6个试件的延性均较好,延性范围为4.41~8.35,满足抗震时结构位移延性系数大于3的要求;正交布管方式下配置型钢剪力架的板柱节点位移延性最小,在设计中应采取措施改善该类节点的延性;(3)所有试件未出现脆性破坏现象,表现为延性较好的典型弯曲破坏特征,说明局部实心加暗梁的节点构造是合理的和必要的。

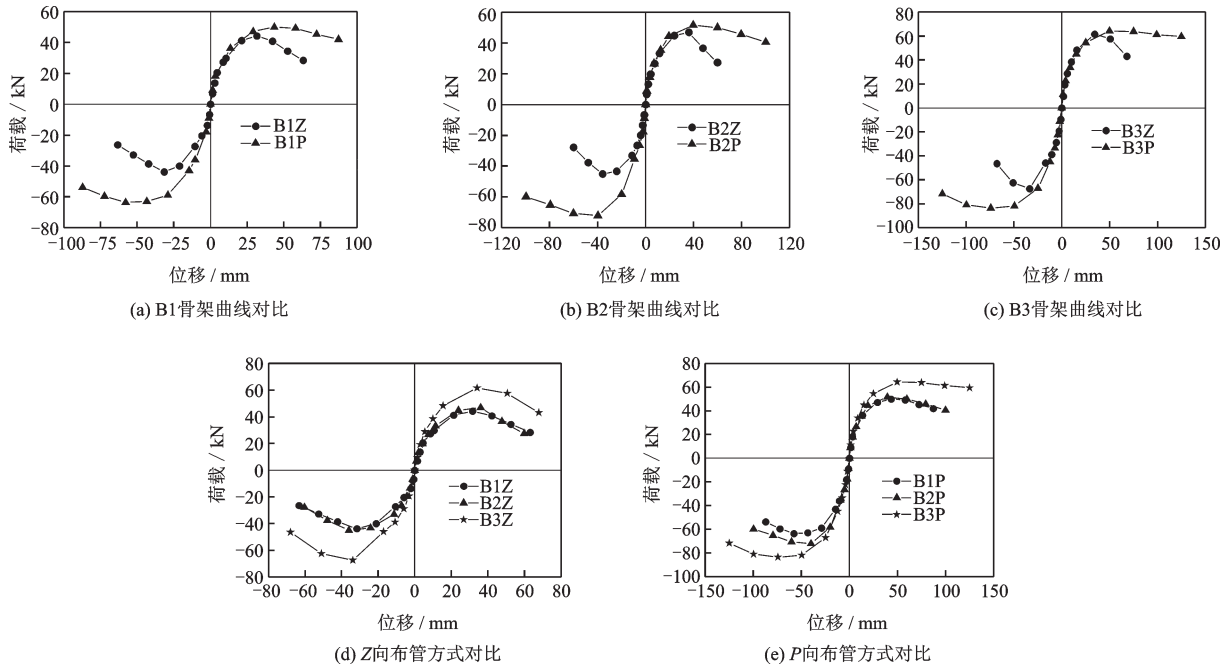


图8 试件骨架曲线

Fig.8 Envelop curves of test specimens

表4 试件荷载特征值和位移延性系数

Table 4 Characteristic values of load and ductility

编号	加载方向	P_{cr}/kN	Δ_{cr}/mm	P_y/kN	Δ_y/mm	P_m/kN	Δ_m/mm	P_u/kN	Δ_u/mm	μ
B1Z	正向	13.60	2.83	27.20	8.55	44.20	31.60	28.40	63.10	7.38
	反向	-13.60	-2.23	-27.20	-10.60	43.80	-31.60	-26.40	-63.30	5.97
B1P	正向	18.00	3.26	36.00	13.60	49.80	43.50	41.90	87.30	6.44
	反向	-18.00	-2.93	-36.00	-10.40	-63.60	-57.80	-53.80	-87.10	8.35
B2Z	正向	19.80	4.95	33.00	11.38	46.91	36.05	27.35	59.81	5.26
	反向	-13.20	-2.60	-33.00	-11.32	-45.09	-36.00	-27.81	-60.20	5.32
B2P	正向	17.60	3.91	44.00	19.37	51.56	39.65	40.59	98.65	5.09
	反向	-17.60	-2.37	-44.00	-13.79	-72.22	-39.76	-59.91	-99.65	7.23
B3Z	正向	19.20	3.02	48.00	15.46	61.62	34.10	21.49	68.21	4.41
	反向	-19.20	-3.03	-48.00	-15.47	-67.48	-33.87	-27.23	-68.29	4.41
B3P	正向	22.40	4.06	56.00	22.49	63.73	74.99	60.58	125.09	5.56
	反向	-22.40	-4.08	-56.00	-18.42	-83.63	-74.37	-71.75	-125.00	6.79

2.5 刚度退化

采用割线刚度 k_i 来表示刚度退化。割线刚度定义为：

$$k_i = (|+F_i| + |-F_i|) / (|\Delta_i| + |-\Delta_i|) \quad (1)$$

式中， $+F_i$ 、 $-F_i$ 为位移延性系数为 i 时正、负峰值点对应的荷载值； $+\Delta_i$ 、 $-\Delta_i$ 为位移延性系数为 i 时正、负峰值点的位移。

试件刚度退化曲线如图9所示。由图9可知：

- (1) 试件在低周反复加载过程中，刚度退化明显，破坏时试件刚度只有初始刚度的10%左右；
- (2) 平行布管方式板柱节点刚度退化比正交布管方式板柱节点刚度退化慢；
- (3) 试件刚度退化主要发生在混凝土开裂后至屈服阶段，即位移大致为0~30 mm；试件屈服后的刚度退化相对缓慢。
- (4) 配置型钢剪力架的板柱节点(B3)初始刚度和残余刚度均大于

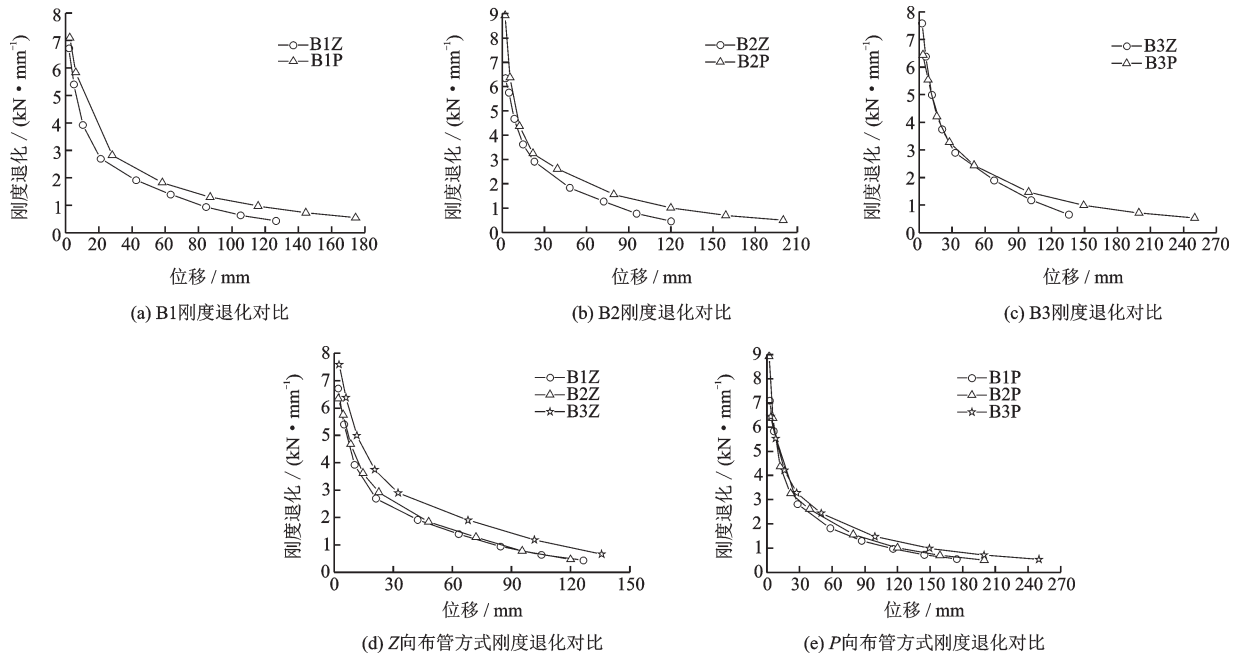


图9 试件刚度退化曲线

Fig.9 Stiffness degradation curves of test specimens

基本试件(B1)和配置弯起钢筋试件(B2)。

2.6 等效黏滞阻尼系数

板柱节点的耗能能力可以用等效黏滞阻尼系数 h_e 衡量,等效黏滞阻尼系数越大,说明试件的耗能能力越好,反之,说明试件的耗能能力越弱。采用屈服荷载、峰值荷载和破坏荷载下的滞回曲线面积来计算 h_e 大小,试件等效黏滞阻尼系数见表5。

表5 试件等效黏滞阻尼系数

Table 5 Equivalent viscous damping coefficient

单位: %

试件编号	屈服荷载	峰值荷载	极限荷载
B1Z	46.7	25.7	18.7
B1P	41.0	26.9	23.2
B2Z	43.0	24.4	19.1
B2P	36.9	31.9	26.4
B3Z	38.6	30.2	23.1
B3P	35.0	31.1	29.3

由表5可知:

(1)在试件屈服之前,正交布管方式板柱节点耗能能力均比平行布管方式板柱节点耗能能力好;试件屈服阶段后,正交布管方式板柱节点耗能能力比平行布管方式板柱节点耗能能力降低快。在达

到峰值荷载时,平行布管方式的等效黏滞阻尼系数均大于正交布管方式,说明前者的耗能能力比后者的耗能能力强。

(2)加载至极限荷载时,试件B1Z、B2Z和B3Z的等效黏滞阻尼系数分别为0.187、0.191和0.231,配置弯起钢筋和型钢剪力架使得板柱节点耗能能力分别提高了2.1%、23.5%,说明配置弯起钢筋对提高正交布管方式板柱节点板柱节点的耗能能力有限,配置型钢剪力架对提高板柱节点耗能能力的效果较好。

(3)加载至极限荷载时,试件B1P、B2P和B3P的等效黏滞阻尼系数分别为0.232、0.264和0.293,配置弯起钢筋和配置型钢剪力架使得板柱节点耗能能力分别提高了13.8%、26.3%,提高程度均大于正交布管方式。

3 结论

(1)空心楼盖板柱结构增强节点在低周往复荷载下的受力与破坏过程表明空心管布置方向对节点的抗震性能影响较大。平行布管方式下的板柱节点的抗弯承载力、刚度、耗能能力和刚度退化等抗震性能指标均优于正交布管方式布管下的板柱节点。

(2)正交布管方式下空心楼盖板柱节点在往复

荷载下的滞回曲线呈反S形,平行布管方式下的板柱节点的滞回曲线呈纺锤形,前者因正交布管使得截面抵抗矩减小,滞回曲线捏缩,导致耗能能力不理想。

(3)配置型钢剪力架,可有效提高空心楼盖板柱节点的抗弯承载能力与抗震性能。因受弯时弯起钢筋处于截面的中和轴附近,对节点抗震性能的提高作用不明显。因此,在板柱结构设计中,除考虑增强元件对节点抗冲切性能的提高作用外,还应协同考虑该元件对节点抗震性能的提高作用,以兼顾节点抗冲切与抗震需求。

(4)在空心楼盖板柱结构整体结构抗震设计中,应根据建筑平面和抗侧力结构布置,合理选择以空心管(或柱状芯材)为空心材料的空心楼盖布管方式,避免板柱框架结构在某一方向上刚度过小而成为结构抗震能力的薄弱环节。建议根据建筑平面布局和抗侧力结构布置,合理选择空心芯材布置方向和选用空心楼盖板柱节点增强方式(配置节点增强元件)。

参考文献:

- [1] 程懋堃. 关于无梁楼板结构的抗震能力[J]. 建筑结构, 2011,41(9): 108-110,140.
Cheng M K. Seismic capacity of flat slab column structure [J]. Building Structure, 2011, 41 (9) : 108-110, 140. (in Chinese)
- [2] Rosenblueth E, Meli R. The 1985 earthquake: causes and effects in Mexico city [J]. Concrete International, 1986,8(5):23-34.
- [3] Mitchell D, Devall R H, Saatcioglu M, et al. Damage to concrete structures due to the 1994 earthquake [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1995, 22 (2) : 361-377.
- [4] Galvis F, Miranda E, Heresi P. Preliminary statistics of collapsed buildings in Mexico city in the September 19, 2017 Puebla-Morelos earthquake [R]. Palo Alto: Blume Earthquake Engineering Center, Stanford University, 2017, 10: 1-18.
- [5] 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,2001,22(4): 49-54.
Ma Y Ch, Lyu X L. Seismic behavior of reinforced concrete slab-column system [J]. Journal of Building Structures, 2001, 22(4): 49-54. (in Chinese)
- [6] Robertson I, Johnson G. Seismic resistance of nonductile slab-column connections in existing flat-slab buildings [J]. ACI Structural Journal, 2006, 103 (3) : 356-364.
- [7] Drkatos I S, Muttoni A, Beyer K. Internal slab-column connections under monotonic and cyclic imposed ratios [J]. Engineering Structures, 2016, 123: 501-516.
- [8] 代伟明,张 扬,钱稼茹. 高重剪比下配置栓钉的板柱节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2012,33(7):126-132.
Dai W M, Zhang Y, Qian J R. Experimental study on seismic performance of slab-column connection with shear studs under large gravity-shear ratio [J]. Journal of Building Structures, 2012, 33 (7) : 126-132. (in Chinese)
- [9] Robertson I, Kawai T, Lee J, et al. Cyclic testing of slab-column connections with shear reinforcement [J]. ACI Structural Journal, 2002, 99(5): 605-613.
- [10] Stein T, Ghali A, Dilger W. Distinction between punching and flexural failure modes of flat plate [J]. ACI Structural Journal, 2008, 104(3): 357-365.
- [11] 党隆基,庞 瑞,梁书亭. 竖向荷载下空心楼盖板柱节点试验研究与计算分析[J]. 东南大学学报(自然科学版),2018,48(3): 478-483.
Dang L J, Pang R, Liang Sh T. Experimental study and calculation analysis on hollow floor slab-column connection under vertical load [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2018, 48 (3) : 478-483. (in Chinese)
- [12] 扶长生,吕西林,康 婧. 柱支承双向板及板柱节点的设计与研究[J]. 建筑结构学报,2009,30(2): 98-106.
Fu Ch Sh, Lyu X L, Kang J. Study and design of column-supported slab and its connection [J]. Journal of Building Structures, 2009, 30 (2) : 98-106. (in Chinese)
- [13] Megally S, Ghali A. Punching shear design of earthquake-resistant slab-column connections [J]. ACI Structural Journal, 2000, 97(3): 720-730. (in Chinese)
- [14] 蒋永生,梁书亭,陈德文. 新型梁柱—板柱组合结构(住宅)体系的试验研究[J]. 土木工程学报,2005,38(10): 5-13.
Jiang Y Sh, Liang Sh T, Chen D W. An experimental study on the new residential system of frame supported flat plate composite structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2005,38(10):5-13. (in Chinese)
- [15] 周朝阳,杨晓华,何任远. 后张无粘结预应力混凝土空心板—柱结构的振动台试验研究[J]. 土木工程学报,2010,43(7): 37-42.
Zhou Ch Y, Yang X H, He R Y. Shaking table test of post-tensioned unbonded prestressed concrete hollow

- slab-column structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(7): 37-42. (in Chinese)
- [16] 郭楠, 郭轶宏, 赵婷婷. 板柱-剪力墙结构抗震性能分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2010, 26(6): 1 058-1 065.
Guo N, Guo Y H, Zhao T T. Seismic analysis on slab-column and shear wall structures [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University, 2010, 26(6): 1 058-1 065. (in Chinese)
- [17] 吴波, 王明君, 赵新宇. 混凝土空间板柱结构震致落层倒塌的试验研究[J]. 工程力学, 2013, 30(1): 277-287.
Wu B, Wang M J, Zhao X Y. Experimental study on pancke collapse of RC spacial slab-column structures under earthquake[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(1): 277-287. (in Chinese)
- [18] 易伟建, 水森. 基于节点冲切破坏的板柱结构连续倒塌可靠性分析[J]. 工程力学, 2015, 32(7): 149-152.
Yi W J, Shui M. Reliability analysis for progressive collapse of slab-column structure based on the punching failure of the connection[J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(7): 149-152. (in Chinese)
- [19] 吴越凡, 易伟建. 钢筋混凝土板柱结构抗震性能综述[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(8): 45-54.
Wu Y F, Yi W J. State-of-the-art on seismic performance of reinforced concrete slab-column structure[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(8): 45-54. (in Chinese)
- [20] Fick D R, Sozen M A, Kreger M E. Response of full-scale three-story flat-plate test structure to cycles of increasing lateral load[J]. ACI Structural Journal, 2017, 114(6): 1 507-1 517.
- [21] Peng Zh H, Orton S O, Liu J R. Experimental study of dynamic progressive collapse in flat-plate buildings subjected to an interior column removal [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2018, 144(8): 04018094.
- [22] Amadeo B C, Jesus D A, Elena O S. Shaking table tests of a reinforced concrete waffle-flat plate structure designed following modern codes: seismic performance and damage evaluation [J]. Earthque Engineering & Structural Dynamics, 2016, 45: 315-336.
- [23] 建筑抗震设计规范: GB50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
Code for seismic design of buildings: GB50011—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [24] 施澄宇. 地下车库空心楼盖板柱结构设计[J]. 建筑结构, 2013, 43(增1): 32-42.
Shi Ch Y. Structural design of hollow floor slab-column structure in subterranean garage [J]. Building Structures, 2013, 43(Sup 1): 32-42. (in Chinese)
- [25] 框架-板柱组合结构体系技术规程: 苏JG/T020—2006 [S]. 南京: 江苏省工程建设标准, 2006.
Technical specification for composite structure system with frame and slab column: Su JG/T020—2006 [S]. Nanjing: Jiangsu standard for engineering construction, 2006. (in Chinese)
- [26] 混凝土结构设计规范: GB50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
Code for design of concrete structures: GB50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [27] 现浇混凝土空心楼盖技术规程: JGJ T268—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Technical specification for cast-in-situ concrete hollow floor system: JGJ T268—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)
- [28] 建筑抗震试验规程: JGJ/T 101—2015 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
Specification for seismic test of buildings: JGJ/T 101—2015 [S]. Beijing: China Planning Press, 2015. (in Chinese)

(本文责编: 池营营)