

# 混凝土核心筒的水平双向循环加载试验研究<sup>1</sup>

许 洋 赵 均 徐金蓓 李 月 侯鹏程

(北京工业大学城市与工程安全减灾省部共建教育部重点实验室, 北京 100124)

**摘要** 为了研究地震多维性对于混凝土核心筒抗震性能的影响, 对大尺寸混凝土核心筒试件进行了水平双向加载下的拟静力试验。重点研究在双向加载下, 核心筒的破坏形态与机理、承载能力、变形性能、刚度退化等方面的问题。结果表明, 由于水平双向加载下筒体一个方向的损伤影响到另一个方向的性能, 因而对混凝土核心筒的抗震能力造成不利影响。因此, 在实际工程中应合理地考虑这种影响, 这对于确保混凝土核心筒的抗震安全具有重要意义。

**关键词:** 混凝土核心筒 双向加载 抗震性能 结构试验 高层建筑

## 引言

钢筋混凝土核心筒是高层建筑结构体系中的重要构件, 在各水平方向上都具有很大的抗侧移刚度, 成为结构体系抗震设防的第一道防线。而地震时地面运动的多维性使结构地震反应呈多维性, 一个方向的受荷损伤直接影响到另一个方向的抗震能力。因此, 考察核心筒在水平双向地震作用下的性能, 对于核心筒乃至整个结构体系的抗震安全都很必要。在已有的文献中, 对于钢筋混凝土构件在双向加载下的性能研究, 多以柱为研究对象。邱法维等(2001)采用6种加载规则, 完成了7个钢筋混凝土柱试件的双向加载拟静力试验, 比较了柱在不同加载路径下的破坏特点、累积滞回耗能和损伤情况; 李宏男等(2002)对钢筋混凝土框架柱进行了不同轴压比下, 单、双向循环加载和双向变轴力循环加载, 得到了在不同加载路径和加载方式下力与位移关系的本构模型; Jin-Keun Kim等(2000)提出了预测钢筋混凝土柱, 在竖向力和双向水平荷载作用下的破坏机制和抗震性能的数值方法, 与拟静力试验结果吻合较好。而对于以钢筋混凝土核心筒为对象的双向加载研究, 国内仅杜修力等(2012)采用高宽比2.68的试件, 进行了钢筋混凝土核心筒在双向水平受力条件下的抗震试验, 表明考虑双向加载有明显影响。为推进这方面的工作, 本文在上述研究的基础上, 采用高宽比和轴压比更大的混凝土核心筒试件施加水平双向反复荷载, 并选择已被上述柱试验表明为对构件性能影响较大的加载规

<sup>1</sup> 基金项目 北京市自然科学基金项目和北京市教育委员会科技计划重点项目 (KZ201010005007)

[收稿日期] 2013-01-04

[作者简介] 许洋, 女, 生于1988年。硕士, 助理工程师。研究方向: 混凝土结构及结构抗震。E-mail: xuy0407@163.com

通信作者 赵均, 男, 生于1954年。硕士, 教授。研究方向: 混凝土结构、砌体结构和结构抗震、结构抗震与减震。E-mail: jzhao0415@163.com

则, 研究核心筒的破坏形态、承载力、滞回特性、变形等方面的性能。

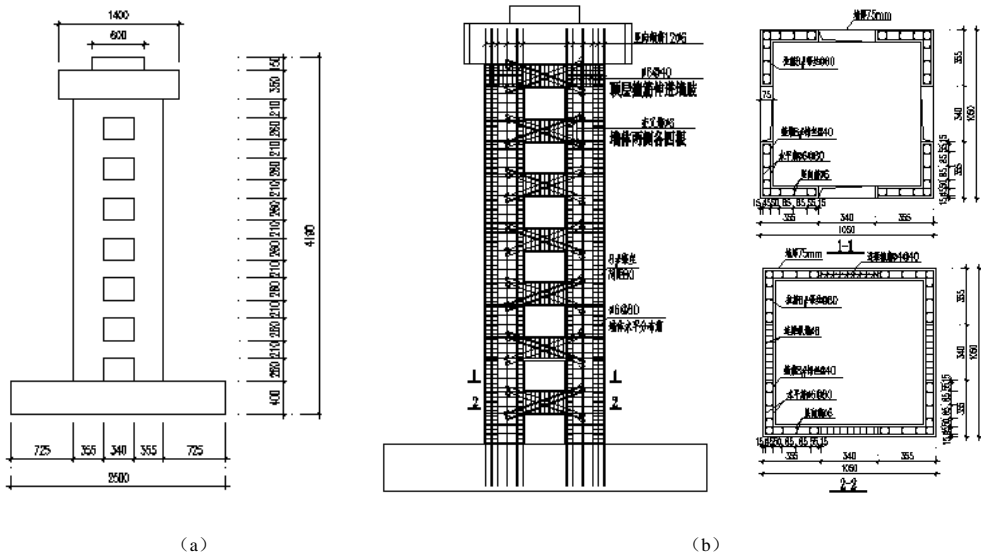
## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

本文试验的混凝土核心筒试件共 7 层, 筒身净高 3290mm, 筒体水平截面轮廓尺寸为 1050×1050mm (高宽比 3.14, 缩尺比例约 1:7.5), 筒体壁厚 75mm。每层各面墙体均有洞口, 且位置相同, 洞口尺寸均为  $b \times h = 340 \times 260\text{mm}$ 。

墙体配置双层钢筋网, 纵、横向均采用  $\phi 6$  钢筋, 筒身角部和洞口两侧部位均按规范进行了加强, 箍筋及拉结筋采用 #8 铅丝, 间距 80mm; 洞口上方的连梁上下各采用  $2\phi 6$  水平纵向钢筋, 箍筋  $\phi 4 @ 40$ , 并配置 8 根  $\phi 6$  的交叉斜筋。为防止第 7 层连梁过早发生剪切破坏, 第 7 层连梁的两端各 150mm 范围内配置了箍筋。实测钢筋抗拉强度  $\phi 6$  为 561MPa;  $\phi 4$  为 736MPa; #8 铅丝为 502MPa。混凝土立方体抗压强度实测均值为 50.6MPa。

试件尺寸及配筋如图 1 所示。



(a) 筒体尺寸; (b) 筒体配筋

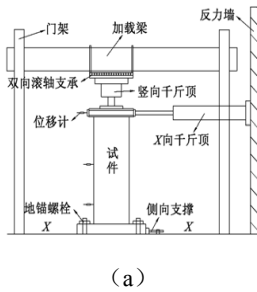
图 1 试件尺寸及配筋图

Fig.1 Dimensions and reinforcement details of specimen

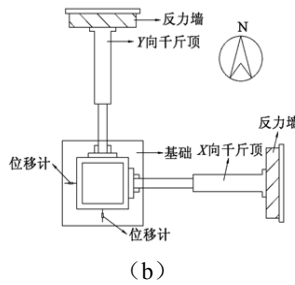
### 1.2 加载装置及加载方案

加载系统由竖向和水平加载系统组成, 其装置如图 2 所示。竖向千斤顶作用在试件顶部, 千斤顶与加载梁间设双向滚轴滑板, 允许试件顶部水平双向位移; 沿试件的 2 个水平方向 (X 和 Y 向) 分别设水平千斤顶, 支承于双向反力墙, 对核心筒顶部施加水平荷载。试验开始后, 对试件施加竖向荷载 930kN (相当于设计轴压比 0.25), 一次完成, 并保持不变。然后由 X 和 Y 向水平千斤顶按照预定的加载路径分别施加水平荷载 (见图 3 示意), 形成双向加载的受力条件。加载采用全程顶点位移控制, 2 个水平方向位移互不相同, 每一级加载取 Y 向位

移控制值为  $X$  向位移的 80%。当某一级加载时的峰值荷载小于试验最大荷载的 85% 时，确定为试件破坏。



(a) 立面图



(b) 俯视图

图 2 试件装置图

Fig.2 Test setup

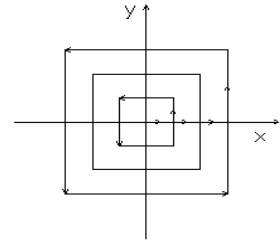


图 3 双向加载路径

Fig.3 Two directional loading paths

### 1.3 量测内容

本试验的量测内容包括：①筒体顶部竖向和  $X$ 、 $Y$  向水平加载点的荷载；②筒体  $X$ 、 $Y$  向 1、3、5、7 层和水平加载点标高处的水平位移；③筒体墙肢的转角和剪切变形；④连梁的梁端转角和剪切变形；⑤墙肢和连梁的钢筋应变；⑥底座的水平位移和转角。所有量测数据均由 IMP 数据采集系统采集。

此外，在试验过程中观察并记录各级荷载下试件裂缝的产生及开展情况，同时在试件上描出裂缝。

## 2 试件破坏过程

第一级  $X$  正向加载，顶点水平位移  $X=2$ ， $Y=0$ （单位：mm，下同）时，南侧 3、4 层连梁梁端首先出现竖向裂缝； $Y$  正向加载，当  $X=2$ ， $Y=1.2$  时，东、西侧 2 层连梁梁端出现竖向裂缝； $X$  负向加载，当  $X=-1.5$ ， $Y=1.2$  时，北侧 3、4 层连梁梁端出现相同竖向裂缝； $Y$  负向加载，当  $X=-1.5$ ， $Y=-1.2$  时，东侧 2、3 层连梁梁端出现竖向裂缝；卸载后裂缝均闭合。

第二级  $X$  正向加载，当  $X=3$ ， $Y=0$  时，南侧 3、4 层连梁端部竖向裂缝继续开展且向上下延伸； $Y$  正向加载，当  $X=3$ ， $Y=2.5$  时，西侧 3 层、南侧 2 层，连梁梁端出现竖向裂缝； $X$  负向加载，当  $X=-3$ ， $Y=2.5$  时，北侧 2 层连梁梁端出现竖向裂缝，北侧 3、4 层连梁梁端裂缝继续开展； $Y$  负向加载，当  $X=-3$ ， $Y=-2.5$  时，东侧 4 层连梁梁端出现竖向裂缝，东侧 3 层、西侧 2 层、北侧 4 层连梁梁端裂缝继续延伸；卸载后裂缝均闭合。

第三级  $X$  正向加载，当  $X=5$ ， $Y=0$  时，南侧 2—4 层、北侧 4 层连梁端部竖向裂缝向上下延伸的更为充分； $Y$  正向加载，当  $X=5$ ， $Y=4$  时，西侧 4 层连梁梁端出现竖向裂缝，东侧 2—4 层连梁端部竖向裂缝继续延伸； $X$ 、 $Y$  负向加载过程中，连梁端部已出现的竖向裂缝有不同程度的发展。卸载后部分裂缝不闭合。

第四级  $X$  正向加载，当  $X=8$ ， $Y=0$  时，南侧 1、2 层连梁梁端相继出现竖向裂缝； $Y$  正向加载，当  $X=8$ ， $Y=6.5$  时，东侧 1 层墙肢出现水平缝，西侧 2—4 层连梁端部竖向裂缝继续延伸； $X$  负向加载，当  $X=-8$ ， $Y=6.5$  时，西侧 1—3 层墙肢出现水平缝，南侧 2、4 层连梁端部

竖向裂缝继续延伸;  $Y$  负向加载, 当  $X=-8$ ,  $Y=-6.5$  时, 南侧 1 层墙肢出现水平缝。

第五级  $X$  正向加载, 当  $X=14$ ,  $Y=0$  时, 东侧墙肢水平缝延伸至 2 层;  $Y$  正向加载, 当  $X=14$ ,  $Y=11.5$  时, 东北角墙肢水平缝从底层延伸至 3 层, 相互贯通交错, 西侧 2、4 层连梁中部出现许多细微斜向剪切裂缝;  $X$  负向加载, 当  $X=-14$ ,  $Y=11.5$  时, 南侧 4 层、北侧 2、5 层连梁中部出现细微斜向剪切裂缝, 随后北侧 1—3 层墙肢出现剪切斜裂缝;  $Y$  负向加载, 当  $X=-14$ ,  $Y=-11.5$  时, 西南角墙肢水平缝相互贯通, 从底层延伸至 2 层, 东侧 2—6 层连梁剪切裂缝加多、加宽。

第六级  $X$  正向加载, 当  $X=22$ ,  $Y=0$  时, 北侧 2—6 层连梁端部竖向裂缝和连梁中部斜向裂缝数量增多, 宽度明显加大, 并不断延伸发展, 东侧墙肢水平缝延伸至 3 层;  $Y$  正向加载, 当  $X=22$ ,  $Y=17$  时, 东西侧各层连梁剪切裂缝、墙肢剪切裂缝不断发展;  $X$ 、 $Y$  负向加载过程中, 5、6 层连梁端部竖向裂缝和连梁中部斜向裂缝及墙肢斜向剪切裂缝明显增多。

第七级  $X$ 、 $Y$  双向加荷中, 新裂缝出现不多, 主要为裂缝宽度和长度增大。当  $X=-30$ ,  $Y=-24$  时, 南、北侧 3、4 层连梁端部竖向裂缝达 1mm, 斜裂缝在连梁中部相交, 并向连梁四角发展。墙肢处斜裂缝相互贯通交织, 向转角处发展, 西侧 1 层墙肢斜向剪切裂缝达 0.4mm。

第八级  $X$ 、 $Y$  双向加荷中, 当  $X=-38$ ,  $Y=30$  时, 南、北侧 3、4 层连梁端部竖向裂缝达 1.2mm; 当  $X=-38$ ,  $Y=-30$  时, 底部水平缝沿墙肢宽度完全贯通, 并向墙肢转角处延伸发展, 在转角处相交, 西南角底部缝宽达 3mm。筒体东南、西北角根部产生竖向裂缝, 混凝土压裂。

第九级  $X$  正向加载, 当  $X=46$ ,  $Y=0$  时, 东侧墙肢底部两层水平缝不断加宽;  $Y$  正向加载, 当  $X=46$ ,  $Y=37$  时, 东北 1 层墙肢斜向剪切裂缝明显加宽, 缝宽达 4mm;  $X$  负向加载, 当  $X=-46$ ,  $Y=37$  时, 南侧 3 层连梁端部竖向裂缝达 2mm, 连梁端部混凝土有剥落现象;  $Y$  负向加载, 当  $X=-46$ ,  $Y=-37$  时, 西南角底部缝宽达 3.5mm; 筒体四角根部裂缝相交处混凝土均出现不同程度的剥落现象, 筒体东北角根部混凝土明显压碎。

第十级  $X$ 、 $Y$  双向加荷中, 已无新增裂缝, 原裂缝宽度不断加大, 裂缝处混凝土不断大块脱落。墙肢上斜裂缝和水平缝相互交织, 当  $X=54$ ,  $Y=43.5$  时, 东北角底层最大水平裂缝宽度达 6.5mm。底层墙肢均出现不同程度的起皮现象, 4 个墙肢根部转角处混凝土均被局部压碎, 压碎区域不断增大, 墙体内部混凝土被压碎的声音不断增多, 混凝土开始成块脱落。

第十一级  $X$ 、 $Y$  双向加荷中,  $X$  负向加载, 当  $X=-62$ ,  $Y=50$  时, 筒体东南角底部混凝土被压溃。

筒体试件最终破坏的照片见图 4。

### 3 试验结果及分析

#### 3.1 滞回特性

图 5 为试件总水平荷载—顶点位移滞回曲线。在试件开裂前, 滞回曲线近似直线, 加载曲线和卸载曲线基本重合, 一个方向的加载对另一个方向的影响较小, 试件处于弹性阶段。在试件开裂初期, 连梁端部和墙肢根部出现少量弯曲裂缝, 滞回曲线斜率下降, 表现出刚度退化现象。随着循环级数的增加, 筒体刚度明显降低, 曲线逐渐变缓, 荷载增大不多, 而变形明显增大。一个方向的加载影响了另一个方向的承载力及变形。在整个加载过程中, 滞回环比较对称饱满, 随着弯曲裂缝和剪切裂缝的出现和发展, 滞回环面积逐步增大, 稳定发展。在加载后期, 墙肢上弯曲和剪切裂缝相互交织发展, 水平双

向加载 2 个方向耦合作用的影响愈加突出，削弱了构件的抗震能力。加上连梁塑性铰转动和墙肢根部转角处混凝土破坏，裂缝宽度持续增加，试件刚度退化较快。在双向水平荷载作用下，钢筋混凝土核心筒试件在 2 个方向有稳定的耗能能力，但受到双向耦合作用的影响，承载力和变形性能较差。



(a)

(b)



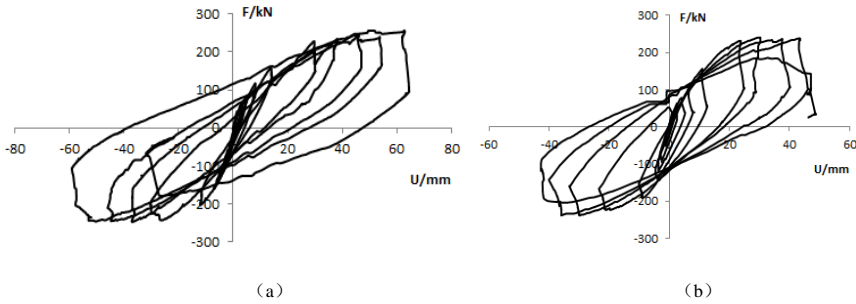
(c)

(d)

(a) 筒体东侧破坏形态；(b) 筒体南侧破坏形态；(c) 筒体北侧破坏形态；(d) 筒体西南侧破坏形态

图 4 试件破坏形态

Fig.4 Failure pattern of specimen



(a)

(b)

(a) 试件 X 向；(b) 试件 Y 向

图 5 总水平荷载—顶点位移滞回曲线

Fig.5 Hysteretic curves of lateral load to top displacement

### 3.2 承载力、位移实测结果及分析

试件开裂荷载  $F_{cr}$ 、屈服荷载  $F_y$ 、最大荷载  $F_d$ 、终止荷载  $F_u$  与相应位移统计见表 1。X 向开裂荷载大于 Y 向,说明主方向 X 向的加载削弱了 Y 向的承载力。当试件开裂时, X 向位移为 2mm, Y 向位移为 1.2mm,开裂前变形很小;随后,侧移增长加快,屈服时 X 向位移为 14.6mm, Y 向位移为 11.8mm,2 个方向变形较为接近, X 向较大些;屈服后,在筒体侧移迅速增大的同时,承载力仍有较大幅度的上升, X 向最大承载力大于 Y 向,而此时 X、Y 向位移分别为 49.6mm、29.01mm。

表 1 承载力、位移实测值

Table 1 Load-carrying capacity and displacement

方向	开裂时		屈服时		最大荷载时		终止荷载时	
	$F_{cr}/\text{kN}$	$U_{cr}/\text{mm}$	$F_y/\text{kN}$	$U_y/\text{mm}$	$F_d/\text{kN}$	$U_d/\text{mm}$	$F_u/\text{kN}$	$U_u/\text{mm}$
X	44	2	189	14.6	249.39	49.62	237.31	62.05
Y	38	1.2	185	11.8	237.49	29.01	217.25	40.68

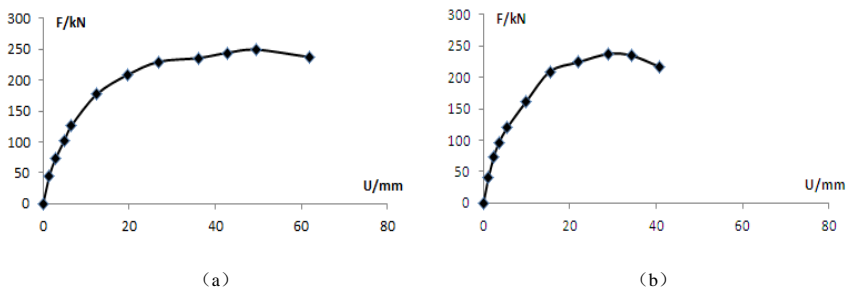
表 2 实测刚度值及衰减系数

Table 2 Measured stiffness and degradation coefficients

方向	$K_0$	$K_c$	$K_y$	$\beta_{c0}$	$\beta_{yc}$	$\beta_{y0}$
X	31.52	22.00	12.95	0.70	0.59	0.41
Y	34.77	31.67	15.68	0.91	0.50	0.45

### 3.3 骨架曲线

图 6 为试件总水平荷载—顶点位移骨架曲线。由于双向加载时 2 个方向相互耦合的作用,裂缝开裂相互交织,互相影响。2 个加载方向骨架曲线形状相似。对比 2 个方向的骨架曲线,沿 X 向的最大承载力略大于 Y 向,而达到最大承载力及试验终止时,沿 X 向的位移值则分别约为 Y 向相应位移值的 1.7 和 1.5 倍。



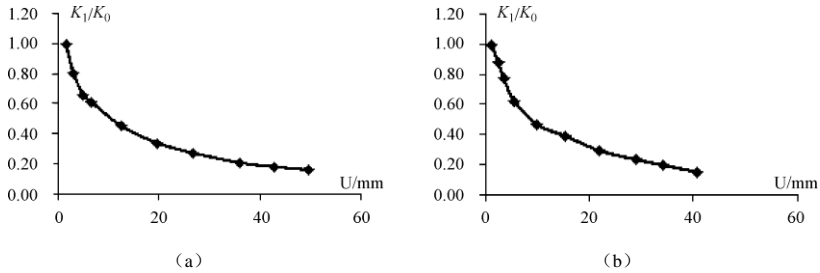
(a) 试件 X 向; (b) 试件 Y 向

图 6 总水平荷载—顶点位移骨架曲线

Fig.6 Skeleton curves of lateral load to top displacement

### 3.4 刚度退化分析

本文采用滞回环峰值点割线刚度来研究试件的刚度变化规律。图 7 给出了试件的刚度退化系数  $K_i/K_0$  ( $K_i$  为第  $i$  级循环的割线刚度;  $K_0$  为弹性阶段的初始刚度) 与顶点位移的关系曲线。表 2 则给出了试件各阶段的刚度值, 其中,  $\beta_{c_0}=K_c/K_0$ ,  $\beta_{y_c}=K_y/K_c$ ,  $\beta_{y_0}=K_y/K_0$ 。由图表可知, 由于双向加载的耦合影响, 一个方向的损伤直接影响到另一个方向的抗震能力, 初期刚度退化较快, 筒体屈服后刚度退化逐渐减慢, 达到最大荷载后则趋于平缓。



(a) 试件 X 向; (b) 试件 Y 向

图 7 刚度退化系数曲线

Fig.7 Stiffness degradation curves

## 4 结论

(1) 本文对高宽比为 3.14、设计轴压比为 0.25 的混凝土核心筒试件进行了试验, 在水平双向加载下, 筒体 2 个方向的墙肢裂缝相互交织, 连梁的弯曲塑性较分别转动, 底部墙肢受拉钢筋屈服后, 混凝土压溃 (转角处最为严重), 最终发生整体弯曲破坏。

(2) 2 个加载方向上的滞回曲线和骨架曲线形状相似, 其中沿加载位移控制值较大的 X 向的最大承载力略大于 Y 向, 而 X 向的位移则比 Y 向大很多。

(3) 水平双向加载导致筒体 2 个方向的损伤并相互影响, 致使破坏加快, 不利于筒体的抗震性能。

在实际工程中, 合理地考虑上述这些影响, 对于确保混凝土核心筒的抗震安全具有重要意义。

## 参考文献

- 杜修力, 贾鹏, 赵均, 2012. 水平双向加载条件下钢筋混凝土核心筒抗震性能试验研究. 建筑结构学报, **33** (10): 47—52.
- 李宏男, 王强, 李兵, 2002. 钢筋混凝土框架柱多维恢复力特性的试验研究. 东南大学学报, **32** (5): 728—732.
- 邱法维, 李文峰, 潘鹏, 钱稼茹, 2001. 钢筋混凝土柱的双向拟静力实验研究. 建筑结构学报, **22** (5): 26—31.
- Jin-Keun Kim, Sang-Soon Lee, 2000. The behavior of reinforced concrete columns subjected to axial force and biaxial bending. Engineering Structure, **23**: 1518—1528.

# Experimental Study on the Behavior of Concrete Core Wall under Biaxially Cyclic Loadings

Xu Yang, Zhao Jun, Xu Jinbei, Li Yue and Hou Pengcheng

(Key Lab of Urban Security and Disaster Engineering, MOE, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract** In order to investigate the behavior of concrete core walls under multi-dimensional seismic motions, a large scaled specimen of concrete core wall, subjected to horizontally biaxial loadings, is tested quasi-statically, to study its failure pattern and mechanism, as well as the load-carrying capacity, deformation ability, stiffness degradation, etc. The test results show that, because of the obvious effect of the damage of the core wall resulted from horizontal loadings in one direction on its performance when loaded in another direction, biaxial loading condition adversely affects the seismic behavior of the concrete core wall. Therefore, consideration of such influence in engineering practice is important for seismic safety of concrete core walls.

**Key words :** Concrete core walls; Biaxial loading; Seismic behavior; Structural test; High-rise buildings