

文章编号: 1001-4888(2012)03-0343-11

双向拟静力加载规则对钢筋混凝土 高墩滞回性能的影响^{*}

夏樟华¹, 宗周红², 程浩德¹

(1. 福州大学 土木工程学院, 福建福州 350108; 2. 东南大学 土木工程学院, 江苏南京 210096)

摘要: 通过四种不同双向加载规则的钢筋混凝土高墩拟静力试验, 初步研究了双向拟静力加载规则对其滞回特性的影响规律。本文主要介绍钢筋混凝土高墩的试验构件设计, 加载装置、测试方法和加载规则, 着重比较了对角线加载、正方形加载、菱形加载和圆形加载等四种加载规则的钢筋混凝土高墩的滞回性能, 包括荷载一位移滞回曲线、荷载一位移骨架曲线、荷载退化、刚度退化以及累积滞回耗能的特点, 并分析这些特点与双向加载规则之间的关系。结论认为: 对角线加载模式加载效率高且能较好反映高墩双向抗震滞回性能, 适合于高墩的双向拟静力试验研究。

关键词: 钢筋混凝土高墩; 双向拟静力试验; 加载模式; 双向滞回特性

中图分类号: U441. 3; TU375. 3

文献标识码: A

0 引言

地震对结构的作用是多维的, 对震害的调查研究和试验研究表明, 水平双向的地震比单向地震对钢筋混凝土构件破坏要大很多^[1]。拟静力试验是研究结构或构件抗震性能最广泛的试验方法。单向的拟静力试验方法已经比较成熟, 而双向加载的拟静力试验研究还在不断发展和完善中。双向拟静力试验结果与试验加载规则有比较密切的联系, 目前还没有这方面的规范或规程。在试验中通常使用位移控制加载模式, 根据位移加载方式的不同, 双向加载规则包括对角线加载、两个方向交替加载、矩形加载、菱形加载、椭圆形加载等多种双向加载规则, 图 1 为常见的一些双向加载规则^[2]。很多学者在加载模式对双向拟静力试验结果的影响、双向加载和单向加载对试件滞回性能的影响都作了研究。

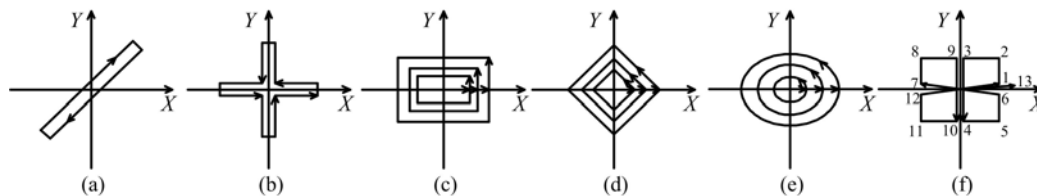


图 1 双向低周反复加载制度

Fig. 1 Bi-directional low cyclic loading rules

K. Kobaysshi 等^[3]采用对角线、圆形、椭圆形、菱形、矩形、两个方向交替加载等六种加载规则, 研究了墩高 0.8m 的圆形截面钢筋混凝土柱的双向加载和单向加载滞回特性的区别, 认为双向耦合作用会

^{*} 收稿日期: 2011-08-24; 修订日期: 2012-01-14

基金项目: 2009 年度福建省科技计划项目 (2009D054) 和教育部博士点基金项目 (20110092110011)

通讯作者: 夏樟华 (1980—), 男, 博士研究生, 从事桥梁抗震性能评价和加固研究。E-mail: xiatian@fzu.edu.cn

降低圆形墩两个方向的恢复力,但对不同加载模型影响的差异没有讨论。S. N. Bousias 等^[4]等设计了十二根剪跨比为 6 的钢筋混凝土柱,考虑轴力和单向或者双向弯曲作用,各试件的参数相同,但加载路径发生不同。试验结果表明水平荷载之间的耦合作用显著,刚度和强度下降,但总耗能能力提高,对于不同加载路径之间的差异没有明确分析和比较。杜宏彪等^[5]对钢筋混凝土悬臂柱按一定荷载角加载来考虑双向弯矩的框架柱反复荷载试验,柱高 0.65m,加载角度分别为 16°,30°,45°,这种加载方式中 x 和 y 方向力按同一比例增加或减小,能部分地模拟框架柱在水平地震作用下的恢复力特性。邱法维等^[6]论述了结构多维拟静力实验的加载规则和控制方法,基于 WINDOWS-NT 平台和 Visual C++ 语言开发出多维拟静力加载实验控制软件 TUFT,该软件可以进行单向和 6 种多维拟静力加载试验。邱法维等(2001)^[1]采用 7 种加载规则对 7 个 0.7m 的钢筋混凝土柱进行了水平双向拟静力试验,研究钢筋混凝土柱在双向受力下的相互影响,研究结果认为累积滞回耗能与加载路径的位置和长度有密切关系,双向加载的累积滞回耗能明显大于单向加载时的情况,且双向加载时试件的总体累积损伤比单向加载时的累积损伤严重,但论文没有对双向拟静力试验加载规则的选择进行论述。李宏男等^[7]利用拟静力试验对 0.65m 高钢筋混凝土框架柱分别进行了不同轴压比下单向、矩形双向循环加载和双向变轴力循环加载试验。孙宪春等^[8]为了研究高度 0.9m 钢筋混凝土柱在双向受力及扭转耦合作用下抗震性能,采用矩形、菱形、椭圆形的位移加载模式分别对 3 个钢筋混凝土柱进行了拟静力试验。试验表明,与一维地震作用相比,试件的抗震能力明显减弱,由于多维地震作用的随机性影响,试件的恢复力特性、滞回耗能及损伤特性也与一维地震作用有明显差别。

从已有双向拟静力的试验结果来看,双向拟静力试验可以一定程度上模拟结构的破坏状态,与单向拟静力试验结果比较,双向荷载作用下柱的承载力有较大的下降;构件的强度退化和刚度退化更显著,且不同加载路径对墩的滞回性能影响显著。但已有的研究没有对双向拟静力试验规则与实验结果的关系以及拟静力试验规则如何选择作深入的讨论,所研究的对象基本以低柱为主,而实际结构中存在大量的高墩柱,其双向滞回特性与低柱不同。因此,针对实际桥梁工程中的高墩,通过不同加载规则对双向滞回特性的比较,初步研究了高墩的双向拟静力的试验方法。

1 试验构件设计

以某大桥 60m 薄壁高墩为原型,设计了 4 个 4.8m 的试验构件,轴压比为 0.1,长细比为 13.1,体积配筋率为 1.06%,采用四种不同的加载规则进行拟静力试验,试件 B2 采用对角线加载规则,试件 C1、C2 和 C3 分别采用菱形、正方形和圆形加载规则。钢筋立面布置见图 2,其中纵筋采用 28 ϕ 8,箍筋在墩底塑性区域为 ϕ 6@50mm,其它区域为 ϕ 6@100mm,为了加载的需要,将模型墩顶部设计为 700mm $\times$ 720mm $\times$ 540mm 的实心段,并且在底部制作 250mm $\times$ 800mm $\times$ 1300mm 的底座以固定试件,有效加载高度为 4.2m。试验混凝土和钢筋的材料特性见表 1 和表 2。

表 1 混凝土实测力学参数

Tab. 1 Testing mechanical parameters of concrete

试件 编号	立方体抗压 强度(MPa)	劈拉强度 (MPa)	弹性模量 (MPa)
B2	43.60	3.23	3.08×10^4
C1~C3	47.10	3.77	3.14×10^4

表 2 钢筋实测力学参数

Tab. 2 Testing mechanical parameters of steel bar

规 格	屈服强度 (MPa)	极限强度 (MPa)	弹性模量 (MPa)
ϕ 6	375.27	503.81	2.11×10^5
ϕ 8	326.51	456.60	2.12×10^5

2 加载仪器布置

试验中,利用预留的孔洞,试件通过 4 根高强螺杆与地梁固结,竖向加载设备采用稳压千斤顶(与顶部横梁采用平面滑动支座连接),水平荷载采用 MTS 系统公司的电液伺服作动器施加。具体加载布置如图 3 所示,其中,电液伺服作动器最大加载力为 500kN,最大行程为 ± 250 mm,稳压千斤顶最大加载

力为 1000kN,最大行程为±200mm。加载仪器的性能参数见表 4。试验中,构件强轴方向,即图 3 的水平向记为 X 方向,构件弱轴方向,即图 3 中的竖直向记为 Y 方向。与 X 向垂直的两个面分别为 B、D 面,与 Y 向垂直的两个面分别为 A、C 面。

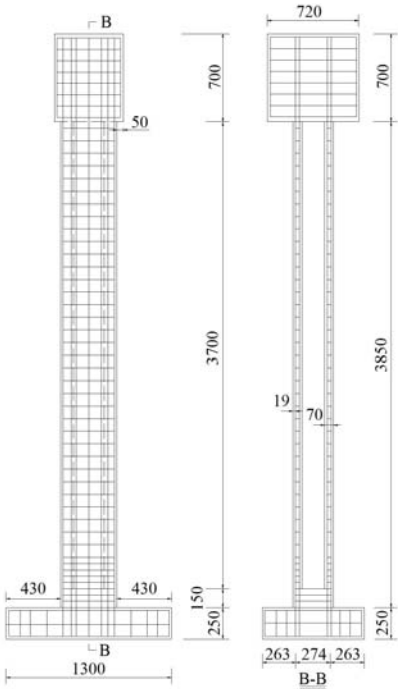


图 2 试件立面钢筋布置图 (单位:mm)

Fig. 2 Reinforcement setup of the specimens (unit: mm)

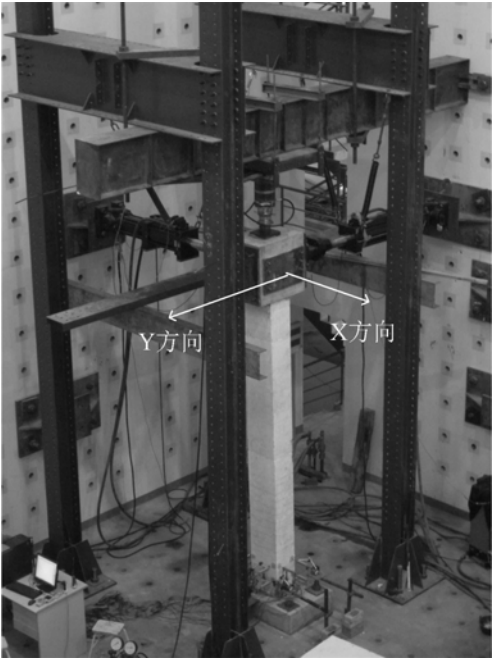


图 3 试验加载装置布置图

Fig. 3 Test set-up

3 加载控制方法

目前拟静力试验中较为普遍采用位移加载控制,试验中,双向拟静力试验控制采用清华大学开发的 TUMT 试验控制软件,外接位移采集系统与 TUMT 控制软件连接,同步采集位移数据。进行了四种加载制度的双向静力试验,四种加载制度分别为对角线加载制度(见图 4),正方形加载制度(见图 5),菱形加载制度(见图 6)和圆形加载制度(见图 7)。

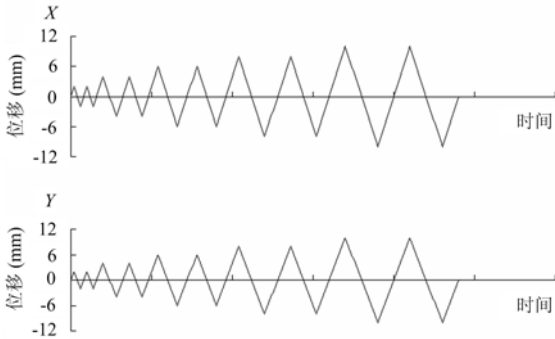


图 4 对角线加载规则分解图

Fig. 4 Exploded view of diagonal loading patter

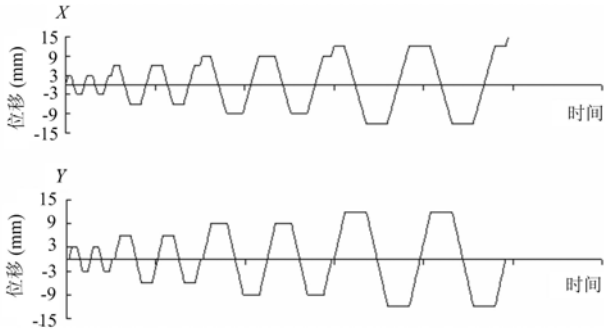


图 5 正方形加载规则分解图

Fig. 5 Exploded view of square loading patter

具体加载过程为:(1)对角线加载拟静力试验采用 X 和 Y 方向双向同步加载,X 方向与 Y 方向的位移幅值比为 1 : 1,每级加载循环 2 圈。整个加载过程为:初始阶段,第一级加载 2mm,以后每级以

2mm 的幅值递增;钢筋屈服以后阶段,以 3mm 为幅值递增加载,待水平承载力开始出现下降时,则以 5mm 为幅值递增,直至试验结束;(2)正方形加载拟静力试验在同一级加载中,X 和 Y 可以达到的位移幅是相同的,一个方向加载时,另一个方向保持该级荷载的最大值,每级加载循环 2 圈。整个加载过程为每级以 4mm 的幅值递增,直至试验结束;(3)菱形加载拟静力试验在同一级加载中,X 和 Y 方向位移绝对值之和始终等于该级加载的最大值,两个加载方向的位移坐标组成直线,每级加载循环 2 圈。整个加载过程为每级以 3mm 的幅值递增,直至试验结束;(4)圆形加载拟静力试验在同一级加载中,X 和 Y 方向位移平方根始终等于该级加载的最大值,两个加载方向的位移坐标组成一最大值为半径的圆,每级加载循环 2 圈。整个加载过程为每级以 4mm 的幅值递增,直至试验结束。

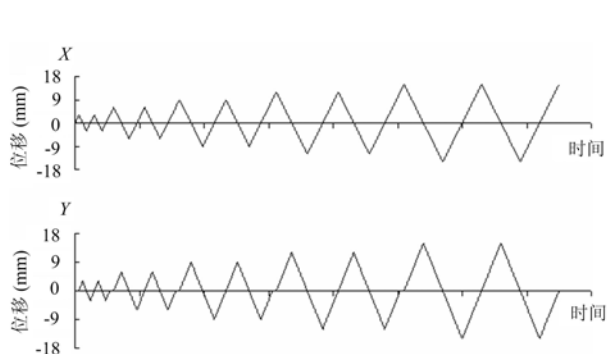


图 6 菱形加载规则分解图

Fig. 6 Exploded view of diamond loading patter

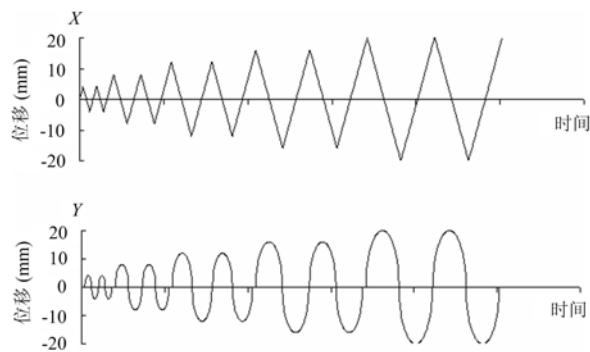


图 7 圆形加载规则分解图

Fig. 7 Exploded view of circle loading patter

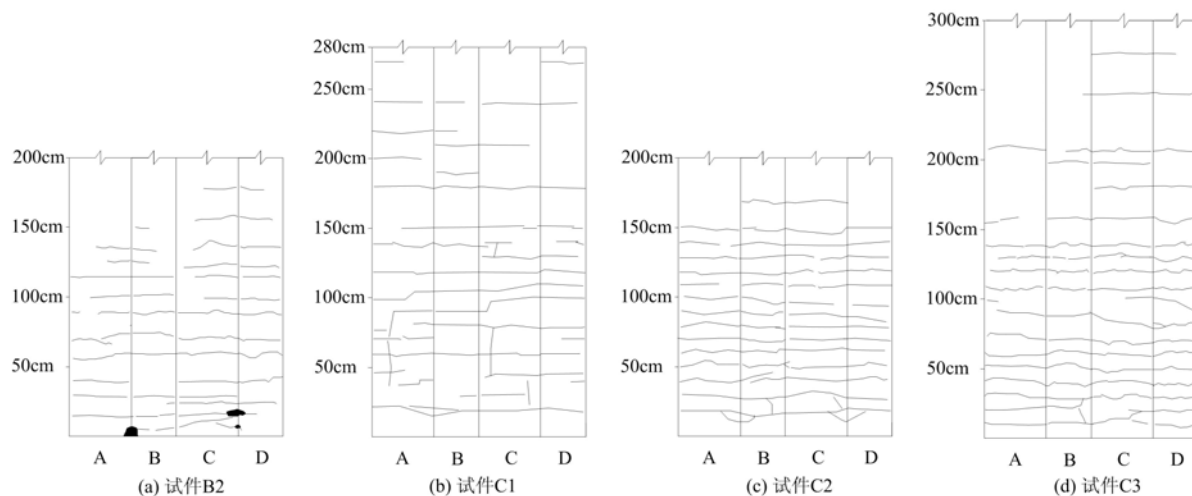


图 8 试件试验最终状态

Fig. 8 Final situation of the test specimens

4 试验结果分析

4.1 试验概况和破坏形态比较

试验过程中,基本过程为实心段和空心段交界处,即离底座顶面 0.15m 处首先出现裂缝,随着加载位移的增大,裂缝不断向上发展。由于加载模式的不同,裂缝出现、钢筋屈服、混凝土剥落、荷载下降以及试验结束对应的加载位移都不同。且加载到同样位移的耗时,以及最终的裂缝分布高度和最大裂缝宽度都有所不同,表 2 列出不同加载模式试验的基本情况。可以看出,对角线加载钢筋比较早屈服,而其它三种加载模式钢筋屈服荷载位移接近。混凝土剥落后,荷载进入下降段,四种加载方式的最大荷载下降对应的位移相差很小。矩形、菱形和圆形加载时间长,加载效率更低。为比较最终状态构件的裂缝分布和破坏,将结果绘于图 8,试件最终破坏形态图中黑色区域为压碎区域,标注的尺寸为试件距墩底

高度。可以看出,各个构件最终的裂缝分布和破坏状态:(1)对角线加载模式,加载位移最大,而裂缝发展高度小;(2)正方形加载模式,加载位移小,但裂缝发展的高度很大,裂缝的间距较大,有较多的竖向裂缝发展;(3)菱形加载模式,裂缝发展比较充分,裂缝间距均匀,墩角位置呈现破坏的趋势;(4)圆形加载模型,裂缝发展高度也较大,裂缝最大高度为 280cm,在 150cm 以下裂缝分布间距较密,且非常均匀,而 150cm 以上部分裂缝分布稀疏。

表 2 不同加载模式试验概况

Tab. 2 General situation of test with different loading rules

构件名称	加载模式	各个加载阶段的位移(mm)				试验最终情况			试验耗时(h)
		混凝土开裂	钢筋屈服	混凝土剥落	荷载下降	位移(mm)	主裂缝宽度(mm)	裂缝分布高度(cm)	
B2	对角线	4	12	31	31	70	大于 2	180	2.5
C1	矩形	6	21	30	32	45	1.8	270	6.9
C2	菱形	6	18	33	33	51	1.2	170	6
C3	圆形	4	18	36	36	64	大于 2	280	7.9

4.2 荷载—位移滞回曲线

低周反复荷载作用下的荷载—位移滞回曲线能够综合反映结构或构件受力性能的变化^[9]。可以描述结构或构件的弹性、弹塑性性质和变形性能,如裂缝的开闭、钢筋的屈服、粘结滑移、局部混凝土的酥裂及剥落,以至结构或构件的破坏等。

根据试验记录的 X 方向和 Y 方向的横向力及分别对应的墩顶横向位移,绘制出各试件的荷载—位移曲线,见图 9,可以看出,各种加载方式下构件的滞回曲线发展并不相同。不同加载方式作用构件 X 方向滞回曲线发展过程的比较见图 10。试件 C1 具有最大的滞回环面积,且始终保持饱满的形状,试件 B2 和试件 C3 也始终保持比较饱满的形状,没有明显的捏缩现象,而试件 C2 捏缩现象比较明显,且从弓形逐步发展为类似 Z 形。

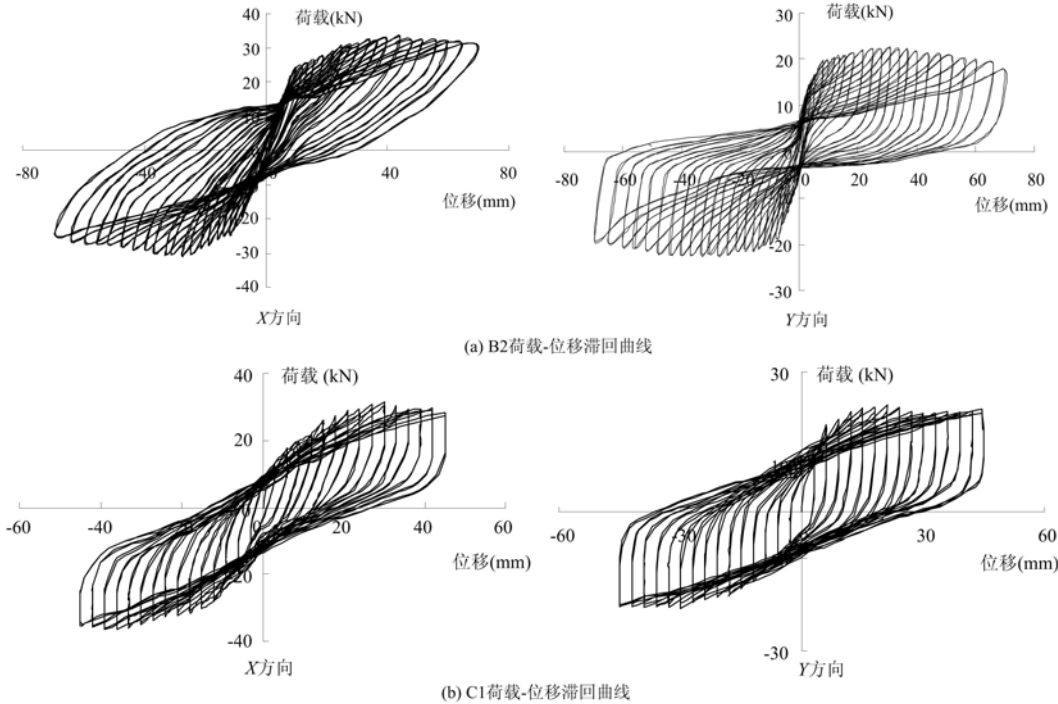


图 9 各个试件荷载—位移滞回曲线

Fig. 9 Load displacement hysteresis curves of all specimens

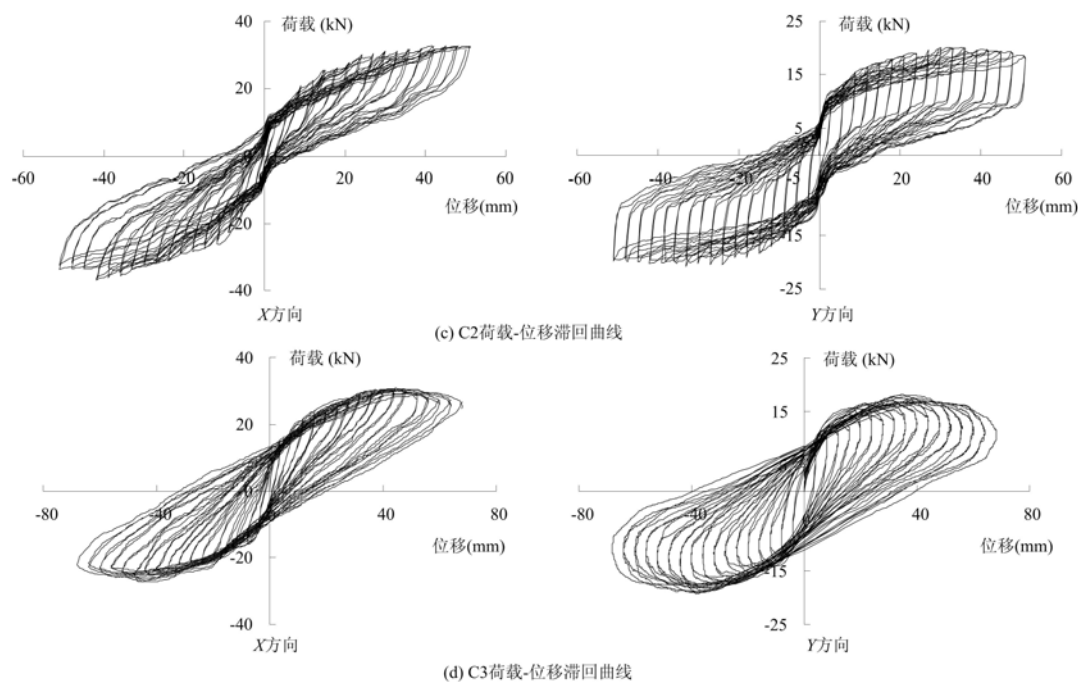


图 9(续) 各个试件荷载-位移滞回曲线

Fig. 9 Load displacement hysteresis curves of all specimens

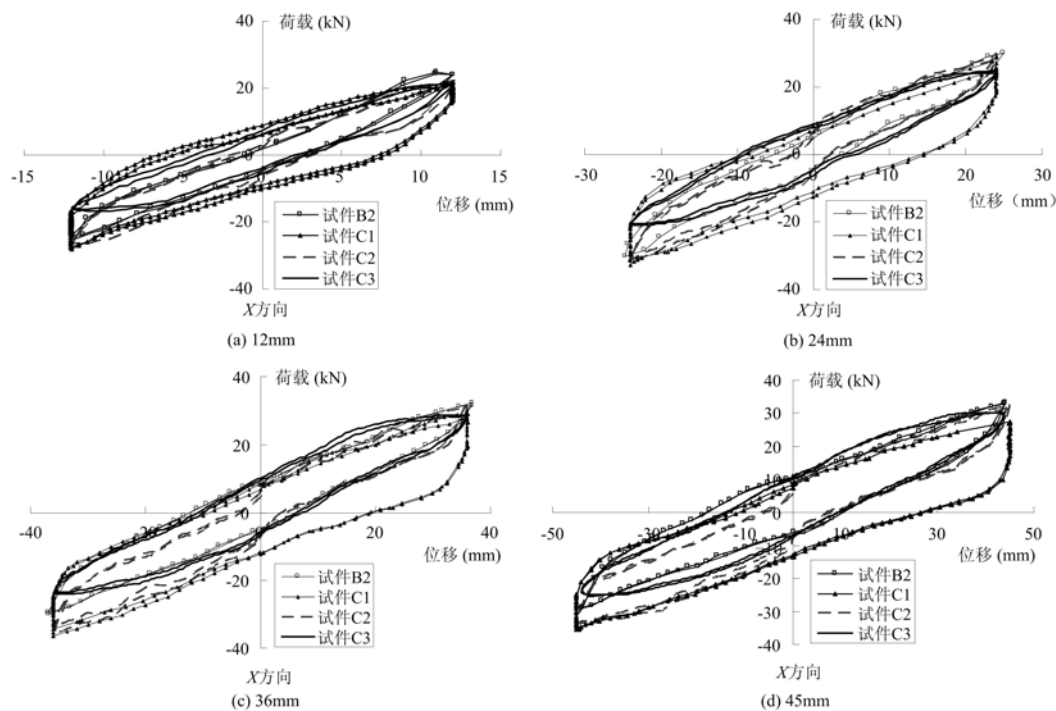


图 10 不同加载规则各试件 X 方向滞回环比较

Fig. 10 Comparison of hysteresis loop of all specimens in X direction with different loading rules

不同加载方式构件 Y 方向滞回曲线及其发展过程的比较见图 11。试件 C1 一直保持比较饱满滞回环形状,且具有最大的滞回环面积。试件 C3 也保持比较饱满的形状,但随加载位移增大,略有捏缩现象产生。试件 B2 和试件 C2 捏缩现象比较明显,其中试件 C2 随加载位移增大,捏缩现象明显增大,呈向 Z 形转变的趋势;试件 B2 有显著的从弓形转变到倒 S 形,然后向类似 Z 形转变的趋势;试件 B2 的滞回环在加载位移较小时,其面积与其它试件相比明显较小,而随着加载位移增大,其滞回环面积逐步接近试件 C2 和试件 C3。

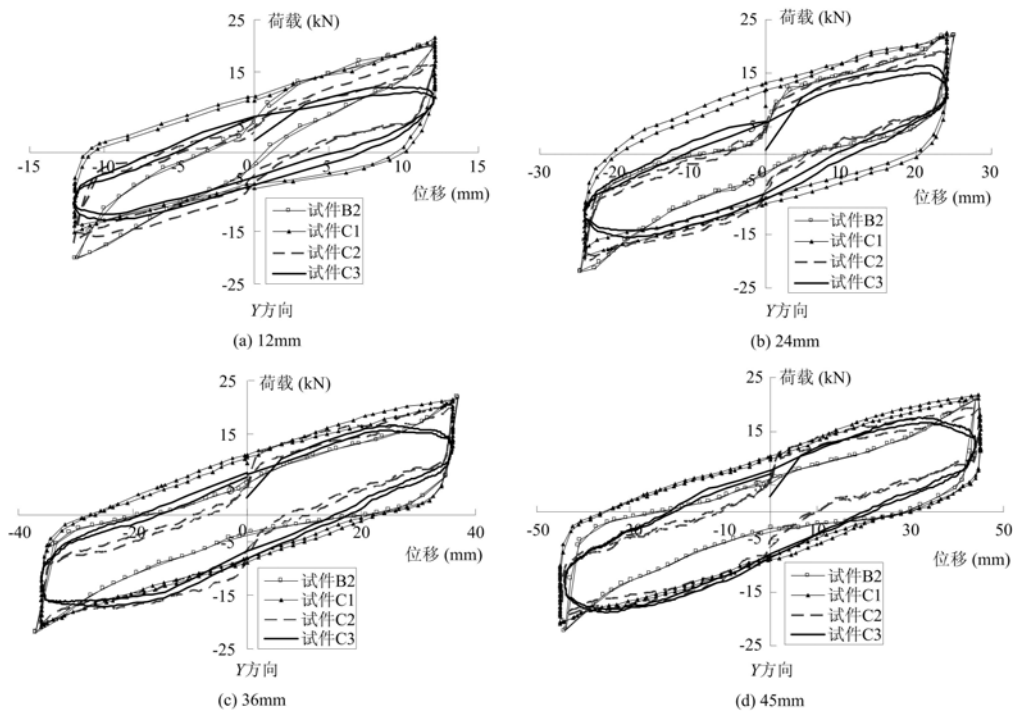


图 11 不同加载方式各试件 Y 方向滞回环比较

Fig. 11 Comparison of hysteretic loop of all specimens in Y direction with different loading rules

4.3 荷载—位移骨架曲线

在低周反复加载试验所获得的荷载—位移滞回曲线中,取所有的每一级荷载第一次循环的峰值点所连接成的包络线称为骨架曲线。骨架曲线大体反映了试件在整个加载过程中的强度、刚度变化以及延性等。将各试件的骨架曲线绘制于图 12。由于正负向荷载存在差异,很难表现出不同加载方式之间的规律,因此将正负向荷载和位移的绝对值平均化,结果见图 13。可以看出,在 X 方向,构件 B2、C1 和 C2 的骨架曲线比较接近,最大荷载均明显大于试件 C3,其中构件 C2 具有最高的最大荷载,而构件 C1 最先达到最大荷载,达到最大荷载后,试件 C1 和试件 C3 刚度下降比较明显。比较 Y 方向的骨架曲线,可以明显地看出不同加载方式试件 Y 方向骨架曲线之间的差别,其最大荷载的比较为构件 B2 最大,然后依次为试件 C1、试件 C2 和试件 C3。达到最大荷载后,试件 C3 刚度下降最大。

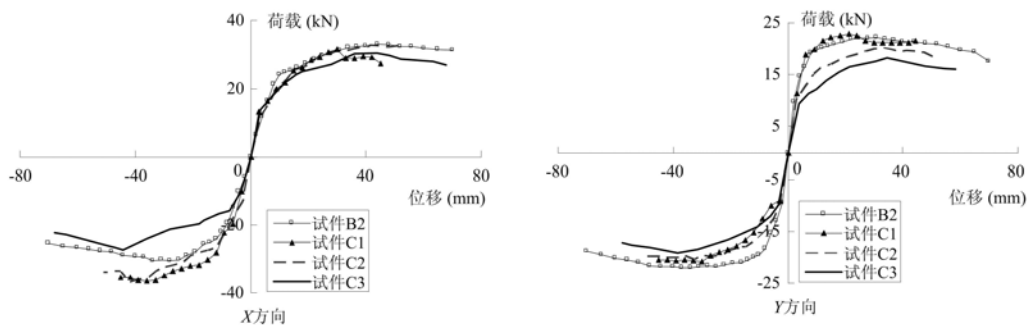


图 12 不同加载方式的试件荷载—位移骨架曲线对比

Fig. 12 Comparison of load displacement skeleton curve of specimens with different loading rules

4.4 荷载退化

结构构件的荷载退化对受力性能有很大的影响,荷载退化越快,表明结构继续抵抗荷载的能力下降越快。荷载退化系数反映每次循环时试件强度及变形性能的变化。为此,采用荷载退化曲线来描述试件的相应特征。用荷载退化系数 α_i 来反映试件加载过程中荷载的整体退化特征,其中 α_i 表示为:

$$\alpha_i = F_i / F_{\max} \quad (1)$$

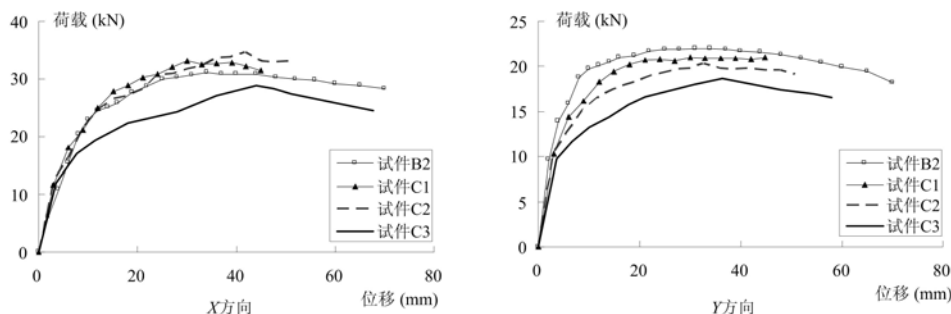


图 13 不同加载方式试件的平均荷载一位移骨架曲线对比

Fig. 13 Comparison of average load displacement skeleton curve of specimens with different loading rules

式中, α_i 为第 i 次加载循环时的荷载退化系数; F_i 为第 i 次加载循环时对应的峰值点荷载; $F_{\max}$ 为加载过程中所得最大峰值点荷载, 即试件的最大荷载。

比较不同加载模式四个构件荷载退化系数曲线, 见图 14。在 X 方向, 试件 C1 和试件 C3 荷载退化较大, 试件 B2 和试件 C2 荷载退化相对较小且退化程度接近。在 Y 方向, 四个试件的荷载退化程度均比较接近。

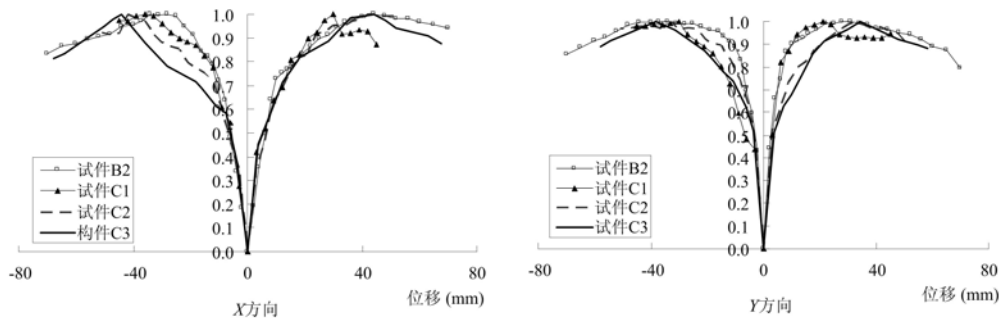


图 14 不同加载方式试件的荷载退化系数对比

Fig. 14 Comparison of load degradation coefficient of specimens with different loading rules

4.5 刚度退化

结构刚度的退化率反映了结构在一定的变形条件下, 刚度随荷载往复次数增加而降低的特性。根据《建筑抗震试验方法规程 JGJ101-96》^[10] 的规定, 试件的刚度可用割线刚度表示, 割线刚度 K_i 按下式表示:

$$K_i = \frac{|\pm F_i| + |\pm F_i|}{|\pm X_i| + |\pm X_i|} \quad (2)$$

式中, $\pm F_i$ 为第 i 次循环正反向加载对应的峰值荷载; $\pm X_i$ 为第 i 次循环正反向加载对应的峰值位移。

不同加载方式各个构件 X、Y 方向刚度退化不同, 见图 15。在 X 轴方向, 加载初期, 试件 B2 的刚度最小, 随加载位移的增大, 试件 B2、试件 C1 和试件 C2 的刚度比较接近, 且均大于构件 C3 的刚度。在 Y 轴方向, 试件 B2 的刚度最大, 试件 C1 和试件 C2 的刚度次之, 且比较接近, 而试件 C3 的刚度最小。

4.6 累积滞回耗能

结构构件耗能性能是评价其抗震性能的一项重要依据。耗能指标越高, 说明结构在地震过程中消耗的地震能量越多, 对结构的抗震安全性越有利。结构构件吸收能量能力的好坏, 可由滞回曲线的滞回环面积和它的形状来衡量。试件的累积滞回耗能为滞回曲线所包围的面积。X 方向、Y 方向累积滞回耗能分别由式(3)和式(4)进行计算:

$$E_x = \int F_x dx \quad (3)$$

$$E_y = \int F_y dy \quad (4)$$

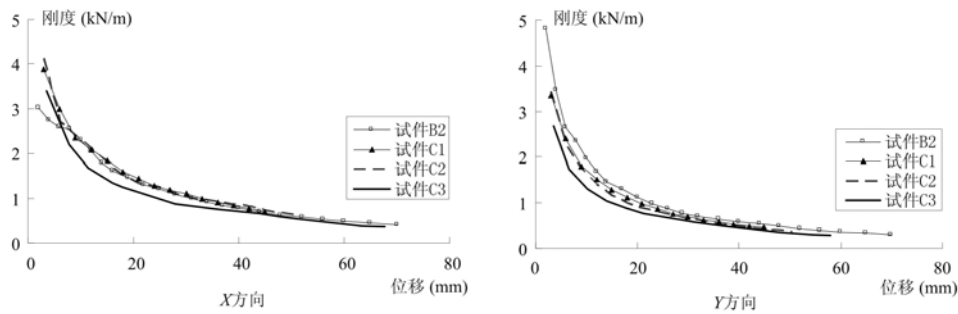


图15 不同加载方式试件的刚度退化曲线对比

Fig. 15 Comparison of stiffness degradation coefficient of specimens with different loading rules

对试件 X 方向和 Y 方向的累积滞回耗能进行比较,见图 16。可以看出,无论是在 X 方向还是在 Y 方向,试件 C1 的各位移的累积滞回耗能都明显大于其它试件的累积滞回耗能。比较另外三个构件的累积滞回耗能,在 X 轴方向,试件 B2、试件 C2 和试件 C3 的滞回耗能在加载位移较小时,非常接近;在加载后期,试件 C3 的滞回耗能最大,试件 C2 次之,而试件 B2 最小。在 Y 轴方向,加载初期,试件 C2 和试件 C3 的滞回耗能比较接近,且均大于试件 B2 的滞回耗能;在加载后期,随构件的损伤加大,试件 B2 的滞回环面积增大,累积耗能超过试件 C3。

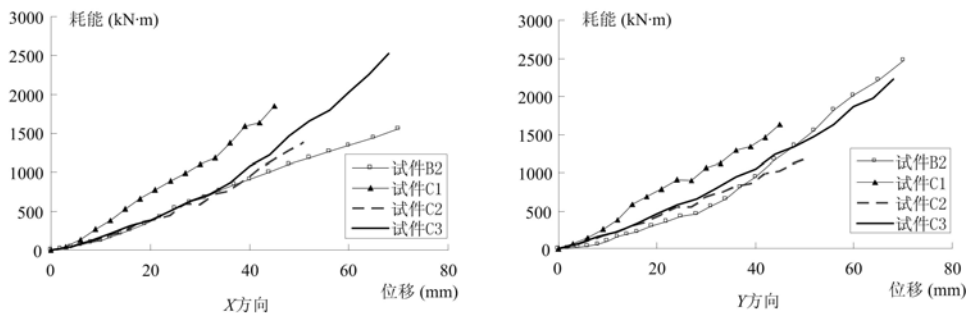


图16 不同加载方式试件的累积耗能对比

Fig. 16 Comparison of accumulated energy of all specimens with different loading rules

5 不同加载方式的试验结果影响分析和加载方式的选择

双向拟静力试验结果与加载方式有明显的联系,不同加载方式根据加载途径不同具有其自身的特点。

对角线加载方式与其它三种方式的显著区别有三点:(1)其加载位移同时增大或同时减小,而其它三种方式都是一个方向增大,另一个方向减小或不变;(2)对角线加载每个循环都有 X、Y 位移同时回到原点的过程;(3)对角线加载从一级位移向下一级位移增大的过程中,都是从零点开始的,而其它加载方式都是 Y 方向位移为零, X 方向位移从上一级的最大值向位移最大值增加,即有一个 X 方向单独位移加载的过程,这是 X 方向损伤较大,导致 Y 方向的刚度减小重要原因。

正方形加载的一个显著特点是其加载过程中,一个方向的荷载保持不变,而另外一个方向的位移荷载不断变化,类似一个方向荷载固定的拟静力循环过程,使得构件双向的耗能能力都充分发挥,其滞回环和耗能能力显著大于其它构件。

菱形加载方式和圆形加载方式比较相似,其区别在于其 X、Y 方向的位移组合不同,圆形加载方式具有更大加载路径和加载位移,其 X 和 Y 方向的位移组合更大,导致其构件的荷载和刚度都最小。

总的来说,正方形加载模式更类似一个方向固定荷载的单向循环加载过程,耦合加载的程度较小,一定程度上会高估试件的滞回耗能能力。而圆形加载模式,加载路径比较复杂,加载耦合程度最大,导致试件的刚度和强度降低最大,也不能合适模拟双向加载过程。对角线加载和菱形加载方式的试验结果相对比较接近,但菱形加载方式相对复杂,加载路径也较长,还具有 X 方向单独加载的过程。高墩双

向拟静力试验加载本身位移大,加载过程复杂,矩形、菱形和椭圆形加载模式加载路径长,加载耗时很大。

综上所述,在研究钢筋混凝土箱型高墩双向荷载作用的抗震性能试验中可以选用对角线加载模式。

6 结 论

对角线、矩形、菱形和圆形加载模式是钢筋混凝土双向拟静力试验常用的加载方式,通过 4.8m 高墩的四种加载模式的滞回性能比较,认为对角线加载模式加载过程相对简单、加载路径短、实施方便、加载效率高且加载到最终状态的时间短,符合高墩加载位移大的试验特点,而且能够较好地反映双向滞回性能,更适用于钢筋混凝土箱型高墩的双向拟静力试验研究。

对角线加载模式是斜向加载模式的一种,在实际的拟静力试件水平双向加载位移比例的不同会引起试验结果的差异,进一步的研究可以比较不同加载比例对斜向加载的高墩试验结果的影响,促进高墩水平双向拟静力试验的发展。

参考文献:

- [1] 邱法维,李文峰,潘鹏等. 钢筋混凝土柱的双向拟静力实验研究[J]. 建筑结构学报, 2001, 22(5):26—31 (Qiu Fawei, Li Wenfeng, Pan Peng, et al. Quasi-static test research of reinforced concrete column under biaxial loading [J]. Journal of Building Structures, 2001, 22(5):26—31 (in Chinese))
- [2] 邱法维,钱稼茹,陈志鹏. 结构抗震试验方法[M]. 北京:科学出版社, 2000 (Qiu Fawei, Qian Jiaru, Chen Zhipeng. Seismic Experiment methods of building structures [M]. Beijing: Science Press, 2000 (in Chinese))
- [3] Kobayashi K, et al. Study on the restoring force characteristics of RC column to bi-directional deflection history [A]. Proc. of Eighth WCEE, San Francisco, 1984, 6:537—544.
- [4] Bousias S N, Guido Verzeletti, Fardis N, et al. Load-path effects in column bi-axial bending with axial force[J]. Journal of Mechanics Engineering, ASCE, 1995, 121(5):596—605.
- [5] 杜宏彪. 双向压弯钢筋混凝土的抗震性能[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1999, 32(4):47—52 (Du Hongbiao. The seismic behavior of bi-directional compression-flexure reinforced concrete columns[J]. Journal of Harbin University of C. E. & Architecture, 1999, 32(4): 47—52(in Chinese))
- [6] 邱法维,潘鹏,宋怡焱等. 结构多维拟静力实验方法及控制[J]. 土木工程学报, 2001, 34(2):8—13 (Qiu Fawei, Pan Peng, Song Yiyang, et al. Multiple dimension loading and control in structure [J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(2):8—13 (in Chinese))
- [7] 李宏男,王强,李兵. 钢筋混凝土框架柱多维恢复力特性的试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2002, 32(5):728—732 (Li Hongnan, Wang Qiang, Li Bing. Experiments on characteristics of multi-dimensional restoring forces of reinforced concrete frame columns [J]. Journal of Southeast university(Natural Science Edition), 2002, 32(5):728—732(in Chinese))
- [8] 孙宪春,邱法维,万力. 钢筋混凝土柱在弯剪扭耦合作用下的试验研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2008, 30(3): 88—92 (Sun Xianchun, Qiu Fawei, Wan Li. Experimental tests on reinforced concrete columns under biaxial and torsional quasi-static loading [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2008, 30(3):88—92 (in Chinese))
- [9] 朱伯龙. 结构抗震试验[M]. 北京:抗震出版社, 1989 (Zhu Bolong. Seismic test of structures [M]. Beijing: Earthquake Press, 1989 (in Chinese))
- [10] JGJ 101—96. 建筑抗震试验规程[S] (JGJ 101—96. Specification of testing methods of earthquake resistant building(in Chinese))

Effect of Bidirectional Quasi-static Loading Rule on Hysteretic Properties of Reinforced Concrete High Pier

XIA Zhang-hua¹, ZONG Zhou-hong², CHEN Hao-de¹

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, Fujian, China;

2. College of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China)

Abstract: The influence of bidirectional quasi-static loading rule on the hysteretic properties of reinforced concrete high pier was preliminarily studied by bidirectional quasi-static test of four reinforced concrete high piers. The tested specimens design, loading devices, testing method and loading rules were firstly introduced in this paper. The bidirectional quasi-static test of reinforced concrete high piers was carried out with four different loading patters: diagonal loading patter, square loading patter, diamond loading patter and circle loading patter. Hysteretic characteristics, including load-displacement hysteretic curves, load-displacement skeleton curves, load degradation, rigid degradation as well as accumulative hysteretic dissipated energy were emphatically compared, and the relationship between hysteretic characteristics and load rules was analyzed. It is concluded that the bi-directional hysteretic properties were well obtained by using the diagonal loading rule, so this loading rule is available and recommended in bidirectional quasi-static test for reinforced concrete high pier.

Keywords: reinforced concrete high piers; bidirectional quasi-static testing; loading rule; bidirectional hysteretic property