

# 偏心受压部分填充混凝土圆形钢桥墩横 桥方向作用下拟静力试验

王占飞<sup>1,2</sup>, 梁永强<sup>1</sup>, 邱国强<sup>3</sup>, 李帼昌<sup>2</sup>

(1. 沈阳建筑大学交通工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 沈阳建筑大学建筑工业化研究院, 辽宁 沈阳 110168;  
3. 山东省公路设计咨询有限公司, 山东 济南 250000)

**摘 要** 目的 研究偏心受压及横桥方向往复荷载作用下部分填充混凝土圆形钢桥墩的力学性能. 方法 在径厚比、长细比等参数相同的条件下, 竖向偏心荷载的偏心率为0.1和0.2时, 对4个圆形截面部分填充混凝土钢桥墩试件进行试验. 分析偏心受压及横桥向荷载作用下部分填充混凝土钢桥墩柱试件试验结果. 结果 竖向偏心荷载的存在改变了试件的受力性能. 当试件的径厚比、长细比参数相同时, 偏心率对钢管柱的承载能力影响比较明显. 偏心率越大, 桥墩的初始水平位移也随着增加. 而偏心荷载的存在使得试件在偏心侧的承载力降低了7%~15%, 另一侧加强了10%~18%, 且偏心率越大, 该现象越明显. 结论 内填混凝土对钢桥墩柱试件的承载力和延性性能有很好地补强效果; 而竖向偏心荷载的存在使得试件在偏心侧的承载力降低, 另一侧加强.

**关键词** 部分填充混凝土; 钢桥墩柱; 竖向偏心荷载; 偏心率; 力学性能

中图分类号 TU392.3

文献标志码 A

## Experimental Study on the Mechanical Performance of Partial Concrete-filled Steel Tubular Bridge Pier under the Vertical Eccentric and Horizontal Cyclic Loading in Bridge Transverse Direction

WANG Zhanfei<sup>1,2</sup>, LIANG Yongqiang<sup>1</sup>, QIU Guoqiang<sup>3</sup>, LI Guochang<sup>2</sup>

(1. school of Transportation Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Research Institute of Construction Industrialization, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 3. Shandong Highway Design. Consulting CO., LTD, Jinan, China, 250000)

**Abstract:** Study on mechanical performance of the partial concrete-filled steel bridge piers under vertical eccentric loading and horizontal cyclic loading. An experimental study on the four partial

收稿日期: 2016-12-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378319); 辽宁省高等学校杰出青年学者成长计划支持项目(LJQ2014060)

作者简介: 王占飞(1976—), 男, 教授, 博士, 主要从事桥梁抗震等方面研究.

concrete-filled steel tubular bridge piers was carried out. At the same the radius-thickness ratio and slenderness ratio, the eccentricity of vertical eccentric loading is 0.1 and 0.2. Analyze the test results of partial concrete-filled steel bridge piers under eccentric loading and horizontal cyclic loading. The mechanical properties of the specimen changed due to the existence of vertical eccentric loading. The influence of eccentricity on the bearing capacity of steel column is obvious. The initial horizontal displacement of the piers increases with the eccentricity greater. The bearing capacity in the eccentric side decreased by 7% to 15%, the other side improve the 10% to 18% with the existence of eccentric loading. And the greater the eccentricity, the more obvious the phenomenon. The filled concrete has good reinforcing effect on ultimate strength and ductility performance of steel bridge pier column specimens; While the bearing capacity in the eccentric side gets lower, the other side goes into strengthen due to the vertical eccentric loading.

**Key words:** partial filled concrete; steel bridge piers; vertical eccentric loading; eccentricity; mechanical performance

目前城市交通日益发达,交通量与日俱增,为缓解交通压力,各式高架桥、环城高速出现在城市的桥梁建设中。钢管混凝土桥墩凭借其良好的抗震性能和社会经济效益等优点,成为桥梁设计者们的新选择,并已在欧美、日本等地震多发国家得到广泛应用<sup>[1-3]</sup>。随着钢管混凝土结构形式研究的不断深入,在原有圆截面和完全填充形式的钢管混凝土结构研究的基础上,逐渐向其他截面形式和填充方式钢管混凝土方向拓展<sup>[4-6]</sup>。其中,在桥墩底部内填一定高度的混凝土,与钢管共同承担水平外力的部分填充混凝土钢桥墩结构形式,受到国内外学者专家的广泛关注<sup>[7-10]</sup>。日本学者通过水平两方向拟静力及振动台试验研究,得知内填混凝土能够延缓钢管局部失稳变形及减少该类桥墩震后的残余变形。此外还对部分填充混凝土箱型截面钢桥墩柱进行了精细化数值分析,采用 Drucker-Prager 模式下的混凝土损伤本构以及钢材屈服后三曲面法则假定,并通过与试验对比,验证了有限元分析的有效性,为定量研究桥墩在外荷载作用下的内力传递,准确把握其破坏机理奠定了基础<sup>[11]</sup>。高圣彬、王跃东、徐旻洋等<sup>[12-14]</sup>采用试验与数值分析方法,对部分填充混凝土箱形钢桥墩的抗震性能进行了研究。结果表明,混凝土填充高度及截面宽厚比参数对桥墩的抗震性能影响较

大,在桥墩根部钢板上合理布置栓钉可以很好地防止钢板与混凝土之间的脱离现象,提高钢桥墩的耗能能力。王占飞<sup>[15-17]</sup>等对无偏心和偏心部分填充混凝土圆形钢桥墩柱在水平往复荷载作用下的弹塑性力学性能进行了试验和数值分析,考察了混凝土填充高度对该类桥墩柱最大承载力、延性等抗震性能的影响。目前关于部分填充混凝土钢桥墩的研究,一般只考虑了桥墩轴力及单向受弯作用的破坏机理和抗震性能,对偏心受压情况研究成果较少<sup>[18-19]</sup>。鉴于此,笔者对偏心受压部分填充钢管混凝土桥墩结构进行试验,研究混凝土填充补强效果以及竖向偏心荷载对桥墩柱面内力学性能的影响,为受竖向偏心荷载作用的该类型桥墩应用提供理论依据。

## 1 试验

### 1.1 试件简介

笔者以城市高架偏心受压的圆形截面钢桥墩为研究对象(见图1)。由于实验室设施条件限制,对研究对象进行缩尺。为防止试件底部和顶部端板焊缝处在试验时破坏,在两处均设置了加强肋板,试件概况如图2所示。图中  $L$  为试件高度;  $l$  为偏心距离;  $P$  为竖向荷载;  $H_0$  为混凝土填充高度;  $H$  为水平往复荷载。



图1 城市高架桥

Fig. 1 Urban viaduct

为研究相同设计参数下竖向荷载偏心率对钢桥墩力学性能的影响,笔者共设计4个试件(P-1、P-2、P-3和P-4),在钢管柱内部填充 $H_0$ 高度的混凝土,试件具体尺寸

表1 试件的几何尺寸及参数

Table 1 The geometrical dimensions and parameters of specimens

试件编号	$L/\text{mm}$	$l/\text{mm}$	$R/\text{mm}$	$t/\text{mm}$	$\lambda$	$R_t$	$P/\text{kN}$	$e$	$H_0/\text{mm}$
P-1	1 530	153	180	5.75	0.31	0.08	320	0.1	465.12
P-2	1 530	306	180	5.75	0.31	0.08	322	0.2	465.12
P-3	1 530	153	150	5.75	0.38	0.07	281	0.1	489.14
P-4	1 530	306	150	5.75	0.38	0.07	274	0.2	489.14

表1中参数 $R_t$ 与 $\lambda$ 的计算式为

$$R_t = \sqrt{3(1 - \nu^2)} \frac{\sigma_y D}{E 2t}, \tag{1}$$

$$\lambda = \frac{2L1}{r \pi \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}}}. \tag{2}$$

式中: $\nu$ 为泊松比; $\sigma_y$ 为屈服应力; $E$ 为弹性模量; $D$ 为钢管柱直径; $r$ 为回转半径.

根据《金属拉伸试验试样》(GB6997—

表2 钢材与混凝土力学性能

Table 2 Mechanical property of steel and concrete

材料	$\sigma_y/\text{MPa}$	$\sigma_u/\text{MPa}$	$\sigma_{cu}/\text{MPa}$	$E_s/\text{MPa}$	$E_c/\text{MPa}$	$\nu$
钢材	347	506	—	218 000	—	0.23
混凝土	—	—	51	—	31 062	0.2

1.2 加载装置及形式

试验的加载方式为先在柱顶施加竖向偏心荷载,在保持其恒定情况下施加水平往复

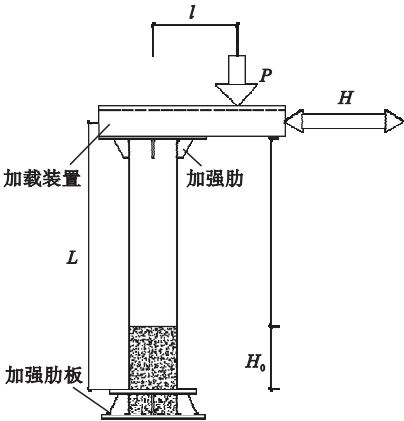


图2 试件的设计

Fig. 2 The design of specimens

及参数见表1.表1中 $R$ 为钢管半径; $t$ 为钢管壁厚; $R_t$ 为径厚比; $\lambda$ 为长细比; $e(e = l/L)$ 为竖向荷载偏心率;其值分别取0.1和0.2.

2010)、《金属拉伸试验试样》(GB6997—2010)及《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010)标准,对试验所采用的钢材及混凝土进行了材质试验,试验测得的钢材与混凝土力学性能参数如表2所示.表中 $\sigma_y$ 为钢材屈服强度; $\sigma_u$ 为钢材极限强度; $\sigma_{cu}$ 为混凝土轴心抗压强度; $E_s$ 为钢材弹性模量; $E_c$ 为混凝土的弹性模量.

荷载,水平荷载采用位移控制.其中竖向偏心荷载通过千斤顶施加,千斤顶由油泵通过溢流阀供油并通过稳压器控制,保证试验过程

中竖向荷载的稳定,同时在千斤顶上部设置滑板装置保证其在水平方向自由滑动;顶部水平往复荷载则通过锚固在反力墙上 MTS 液压伺服作动器施加. 试验装置产生的竖向

荷载由自反力架传至基础,水平荷载则通过作动器由右侧的自反力墙承担. 试验时用螺栓将试件固定在下部连接钢板上,达到固定试验件的目的. 具体试验加载装置如图 3 所示.

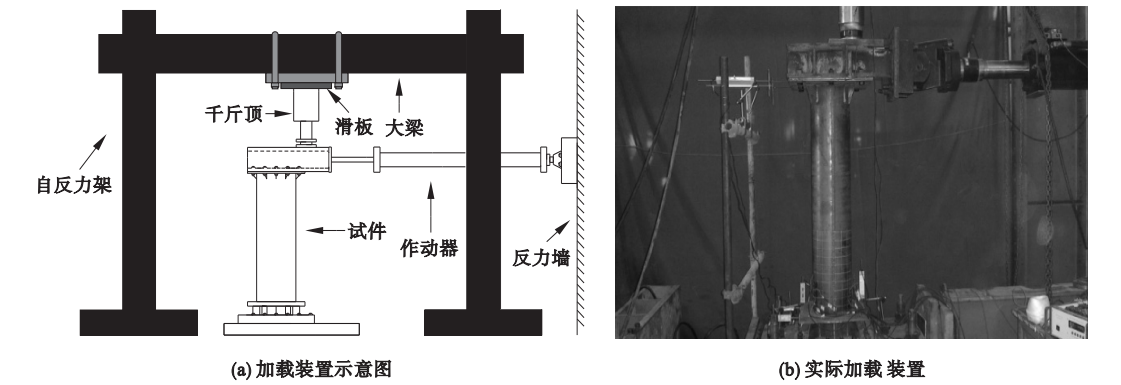


图 3 试验加载装置

Fig. 3 Loading device of experiment

为获得试件在试验过程中的变形及应力分布情况,在试件上布置了位移计和应变片(见图 4). 位移计布置:为了消除试验装置带来的位移误差,在桥墩柱根部底板竖直方向设置 2 个位移计,来监测桥墩底部试件转动位移;在柱顶和柱底横向各设置 2 个位移计,来监测墩身位移变形情况. 应变片布置:为了观测关键截面的应力变化,在试件根部附近沿竖向在钢管一侧外缘粘贴应变片 R1、R2、R3,对应侧外缘粘贴应变片 L1、L2、L3;填充混凝土临界截面上方钢管两侧外缘粘贴电阻应变片 R4、R5 和 L4、L5.

加载时竖向荷载  $P$  值取  $0.15P_y$  ( $P_y$  为试件轴向屈服荷载),水平往复位移  $H$  则按理论屈服位移  $\delta_y$  的倍数逐级递增加载,  $P_y$  和  $\delta_y$  的数值为

$$P_y = A_0 \sigma_y, \tag{3}$$

$$\delta_y = \frac{M_y h^2}{3EI} - \frac{M_y h^2 P}{3EI P_y}. \tag{4}$$

式中:  $A_0$  为钢管柱截面面积;  $h$  为钢管柱高度;  $E$  为钢材弹性模量;  $I$  为惯性矩;  $\sigma_y$  为钢材屈服应力;  $M_y$  为桥墩底部屈服弯矩.

为保证零点时试件位置保持一致,故将每次循环的峰值加减竖向荷载引起的横向初始位移  $\delta_0'$ ,水平荷载具体的加载方式见图 5.

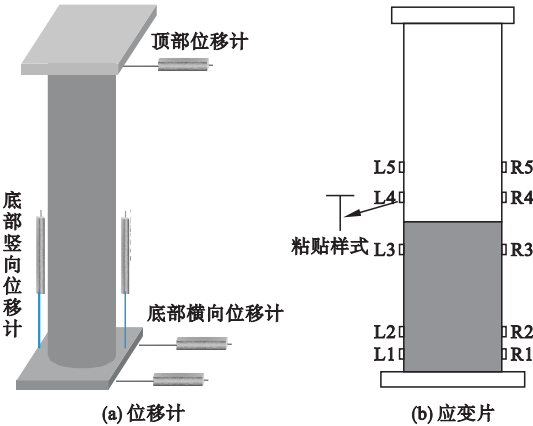


图 4 位移计与应变片测点布置图

Fig. 4 Displacement measuring device and Strain collecting device

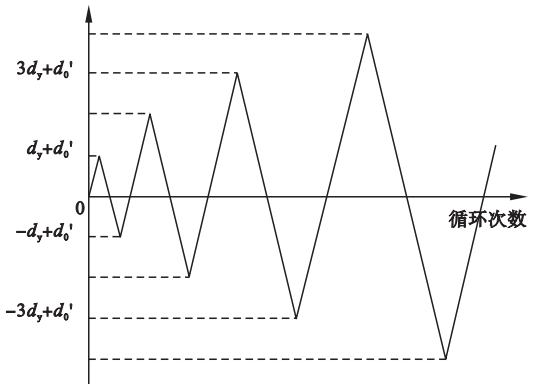


图 5 水平力加载方式

Fig. 5 Horizontal loading pattern

由于试验数据采集技术的原因,竖向加载完毕保存数据后,施加水平力荷载之前需要重置零点,这会导致和施加竖向荷载之前的零点不一致.

2 试验现象

2.1 试件 P-1 试验现象及破坏特征

试验时施加竖向荷载的偏心率  $e$  为 0.1,荷载大小为 320 kN,由柱顶位移计测得竖向偏心荷载引起的试件水平初始位移为 1.5 mm. 在水平往复荷载加载前期,试件处于弹性阶段并没有明显的变化,当水平位移达到 -18.4 mm(位移正负规定:MTS 液压伺服作动器推为正值,拉为负值,下同)后,可观察到钢管柱底部受拉区域表面明显变得光滑并出现有规律的条纹,说明钢材已经屈服. 在此后的加载过程中,试件内部会时常发出啪啪的响声,表明内填混凝土开始和钢管内壁发生接触并受到钢管壁的约束挤压作用,开始发生开裂. 当水平位移力加载到 5 倍计算屈服位移 -36.95 mm 时,在试件底部受压侧开始出现不明显的局部屈曲(见图 6). 与此同时可明显观察到试件在混凝土填充高度以上空钢管部分发生相对弯曲.

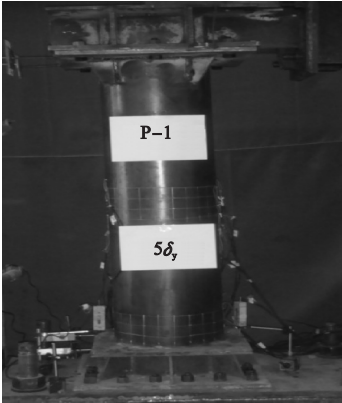


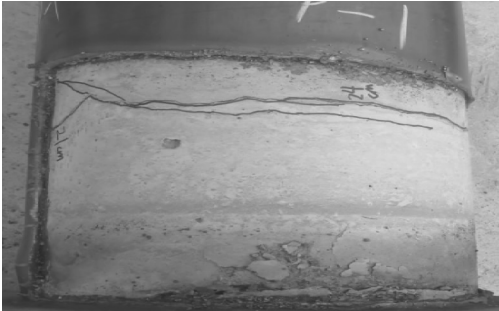
图 6 试件 P-1 屈曲现象

Fig. 6 Buckling phenomenon of specimen P-1

随着水平位移的继续加载,试件 P-1 破坏现象如图 7 所示. 在钢管柱底部 75 mm 高度左右受压侧屈曲鼓起现象逐渐明显,最后鼓起区域蔓延成明显的“象腿”状且不能够恢复正常形状(见图 7(a)). 当水平位移加载至 10 倍计算屈服位移时试件在受压侧的水平承载力已下降到极限承载力的 85% 以下,根据相关试验规程可认为试件已经破坏,因此结束加载终止试验. 对于内填混凝土破坏情况,可看出在钢管发生屈曲变形位置对应的混凝土部分被压碎,其他位置出现了明显的裂缝(见图 7(b)).



(a) 桥墩底部起鼓现象



(b) 桥墩底部内填混凝土破坏情况

图 7 试件 P-1 破坏现象

Fig. 7 Final failure phenomenon of P-1

2.2 试件 P-2 试验现象与分析

试验时施加的竖向荷载偏心率  $e$  为 0.2,荷载大小为 322 kN,竖向偏心荷载引起水平初始位移为 2.02 mm. 在加载前期,试件处于弹性阶段并没有明显的变化,当水平位移达到 20.9 mm 时,试件受压侧已经达到屈

服,同时可观察到钢管柱底部受拉区域表面明显变得光滑并出现有规律的条纹. 当水平位移力加载到 5 倍计算屈服位移 -36.95 mm 时,在试件底部受压侧出现不明显局部屈曲(见图 8).



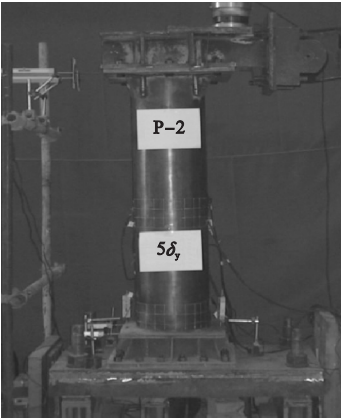
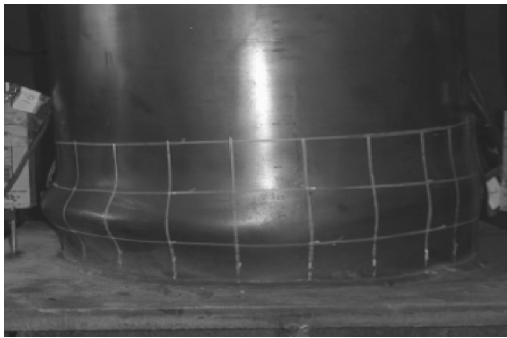


图8 试件P-2 屈曲现象

Fig. 8 Buckling phenomenon of specimen P-2



(a) 桥墩底部起鼓现象



(b) 桥墩底部内填混凝土破坏情况

图9 试件P-2 破坏现象

Fig. 9 Final failure phenomenon of P-2

2.3 试件P-3 试验现象与分析

试件的竖向荷载大小为 281 kN, 偏心率  $e$  为 0.1, 试件水平初始位移为 1.12 mm. 当水平位移达到 -13.9 mm 时, 试件受压侧达到屈服. 当水平位移加载到 4 倍计算屈服位移 -29.56 mm 时, 在试件底部受压侧出现不明显局部屈曲 (见图 10).

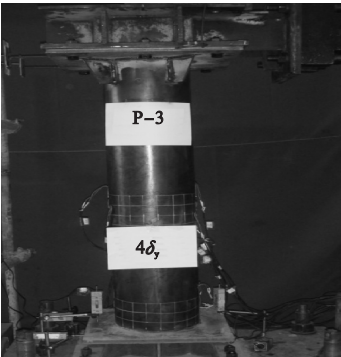


图10 试件P-3 屈服现象

Fig. 10 Buckling phenomenon of specimen P-3

继续加载, 试件 P-2 破坏现象如图 9 所示. 在钢管柱底部 50 ~ 100 mm 高度左右受压侧屈曲鼓起现象逐渐明显, 最后鼓起区域蔓延成明显的“象腿”状且不能够恢复正常形状 (见图 9(a)). 当水平位移加载至 10 倍计算屈服位移时试件在受压侧的水平承载力已下降到极限承载力的 85% 以下, 结束加载终止试验. 试验后切开试件观察内填混凝土破坏情况如图 9(b) 所示, 可看出在钢管发生屈曲变形位置对应的混凝土部分被压碎, 且有明显的锈迹, 同时混凝土柱 13.5 cm 高度处产生断裂.

随着水平位移的继续加载, 试件 P-3 破坏现象如图 11 所示. 在钢管柱底部 30 ~ 70 mm 高度左右受压侧屈曲鼓起现象逐渐明显, 最后鼓起区域蔓延成明显的“象腿”状且卸载后不能恢复原状 (见图 11(a)), 加载至 10 倍计算屈服位移时, 试件在受压侧的水平承载力已下降到极限承载力的 85% 以下, 对于内填混凝土破坏情况, 可看出在钢管发生屈曲变形位置对应的混凝土部分被压碎, 且有明显的锈迹, 同时混凝土柱还在不同高度出现了数条裂缝 (见图 11(b)).

2.4 试件P-4 试验现象与分析

试件的竖向荷载大小为 274.2 kN, 偏心率  $e$  为 0.2, 水平初始位移为 2.7 mm. 在加载前期, 试件处于弹性阶段, 并没有明显的现象发生. 当水平位移达到 -15.1 mm 时, 试件受压侧已经达到屈服. 当水平位移力加载

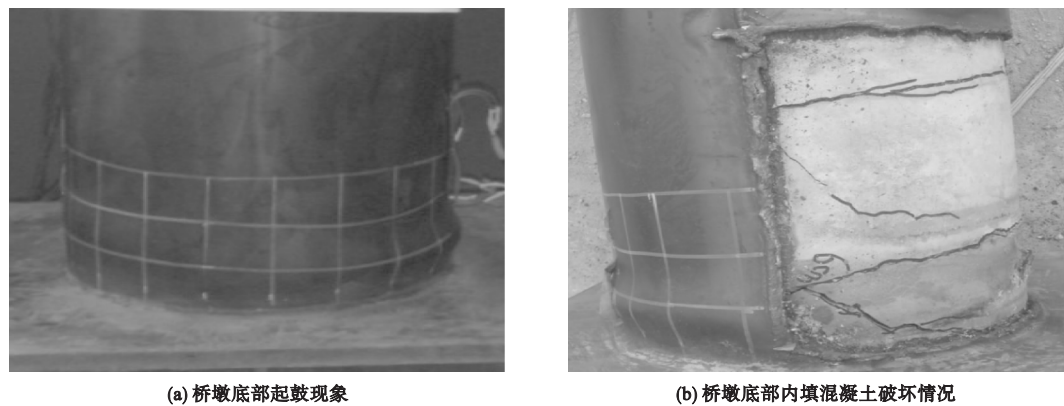


图 11 试件 P-3 破坏现象

Fig. 11 Final failure phenomenon of P-3

到 5 倍屈服位移 -36.95 mm 时,在试件底部受压侧出现不明显局部屈曲(见图 12). 同时可以看出,试件在混凝土填充高度以上空钢管部分发生明显的相对弯曲.

随着水平位移的继续加载,试件 P-4 破坏现象如图 13 所示. 在钢管柱底部 50 ~ 100 mm 高度左右受压侧屈曲鼓起现象逐渐明显,最后鼓起区域蔓延成明显的“象腿”状并且不能恢复(见图 13(a)),对于内填混凝土破坏情况,可看出在钢管发生屈曲变形位置对应的混凝土部分被压碎,且有明显的锈迹(见图 13(b)).

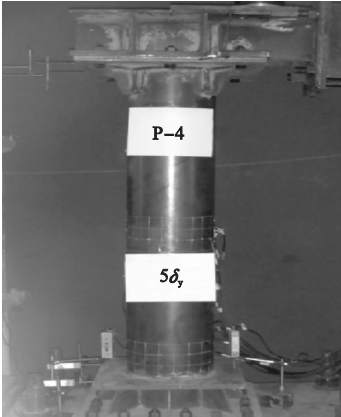


图 12 试件 P-4 屈曲现象

Fig. 12 Buckling phenomenon of specimen P-4

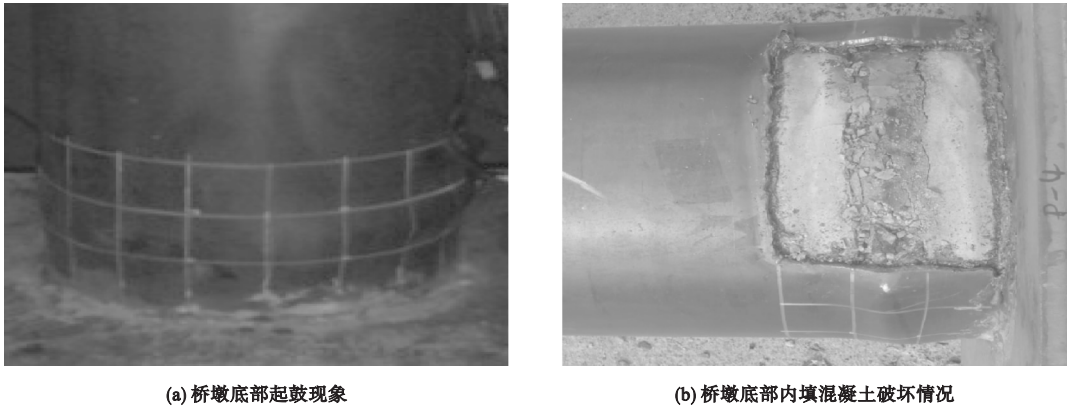


图 13 试件 P-4 破坏现象

Fig. 13 Final failure phenomenon of P-4

### 3 试验结果分析

#### 3.1 试件 P-1 应变结果分析

经对比分析,试件 P-1 的应变结果最具

代表性,以试件 P-1 为例进行应变结果分析. 试验结束后,整理试件在 L1 和 R1 测点的荷载 - 应变曲线如图 14 所示. 图中正应变表示受拉状态,负应变表示受压状态. 从图

14 中的 L1、R1 测点的荷载 - 应变曲线可以看出,在加载前期,荷载  $H$  和应变关系呈明显的线性关系,说明试件还处于弹性阶段;当

达到屈服以后,荷载则随着应变的增加而缓慢增加,同样在对应的应变 - 位移曲线中也能够看出相同的现象.

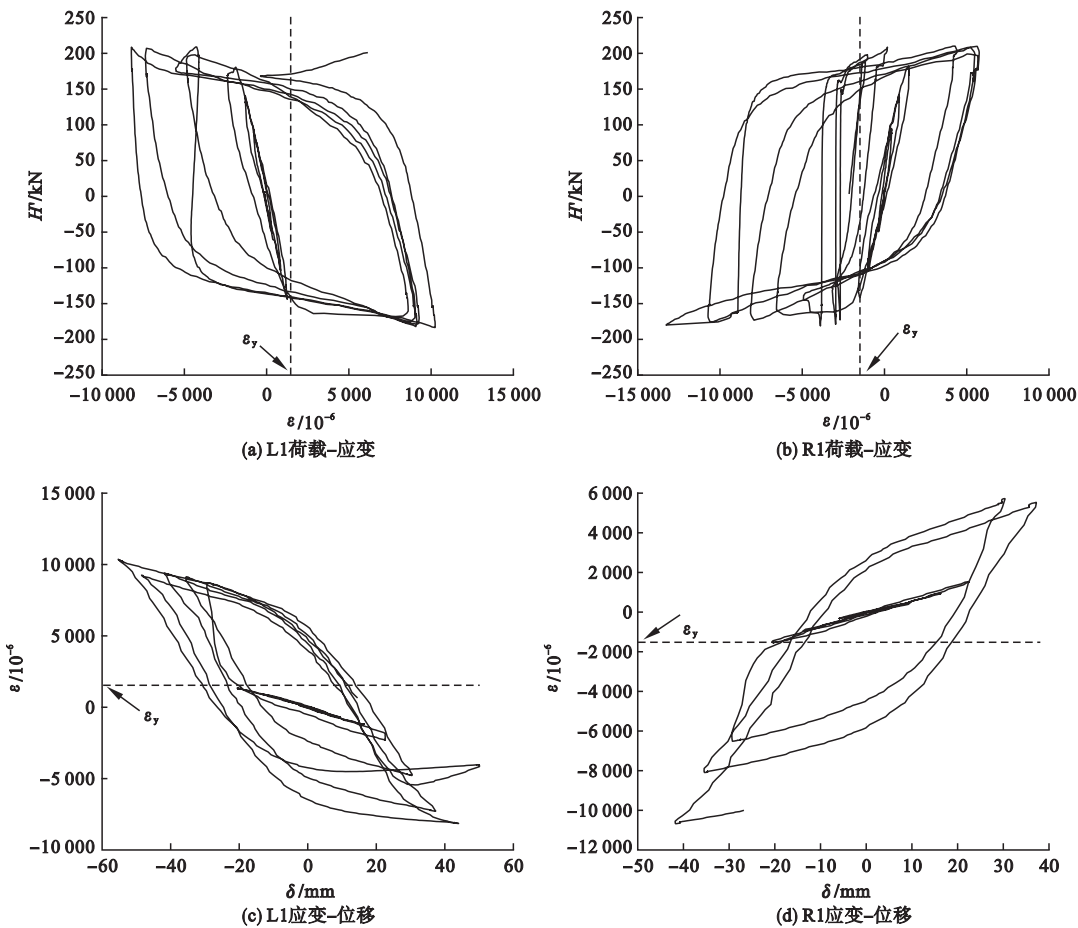


图 14 试件 P-1 荷载 - 应变曲线及应变 - 位移曲线

Fig. 14 Load-strain curves and strain-displacement curves of specimen P-1

综合分析荷载 - 应变曲线和应变 - 位移曲线可得:试件 P-1 的左侧 L1 测点在水平位移达到 -18.1 mm 时屈服,此时相对应的水平力为 -145.5 kN;而右侧 R1 测点在水平位移为 17.8 mm 达到屈服,此时对应的水平力 178 kN.

为进一步研究不同截面高度测点位置应变的变化规律,将试件 L1、L2 和 L4 及 R1、R2 和 R4 位置在各级位移加载步极值点对应的应变进行了对比(见图 15). 图中  $\epsilon_y$  为钢材屈服应变. 从图 15 中可以看出,试件左侧 L2 测点首先达到屈服,相同时刻 L1 和 L4

测点的应变则未达到屈服应变. 在后一步的加载中,L1 测点的应变同样达到屈服应变,此时 L4 测点仍未达到屈服应变. 在之后的加载步中,L2 与 L1 测点应变的增加速度急剧增大,说明测点附近区域发生了屈曲变形,而 L4 测点位置应变则一直保持在屈服应变以内,说明该位置附近区域一直处于弹性阶段,并没有发生破坏. 对于试件右侧同样是 R2 测点首先达到屈服应变,而后 R1 和 R2 应变急剧增加,说明这两处都已发生局部屈曲,R4 位置则一直处于弹性阶段范围内,未达到屈服.



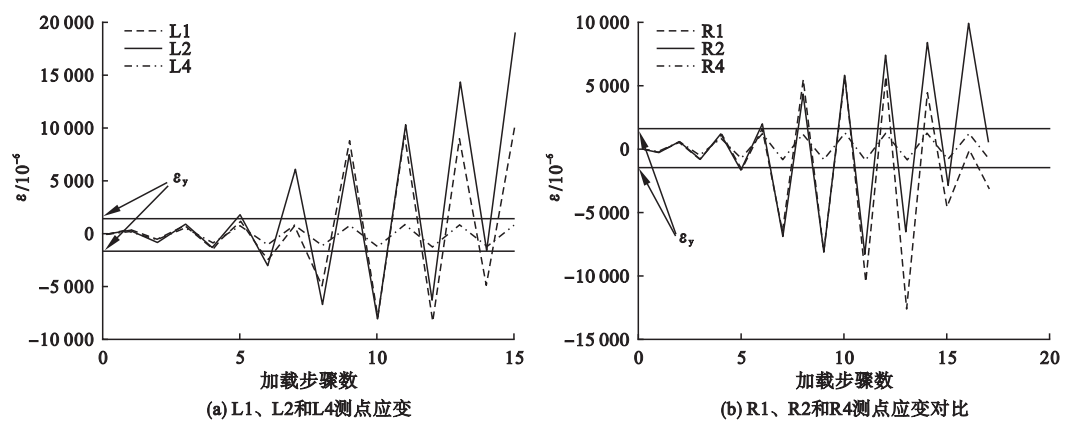


图 15 不同测点应变变化对比

Fig. 15 Comparison of strain variation of different test points

3.2 滞回曲线试验结果分析

为研究试件在偏心受压及面内水平低周往复荷载作用下的力学性能,便于直观表现

试件的承载力、延性等抗震性能,绘制试件的荷载-位移滞回曲线如图 16 所示.

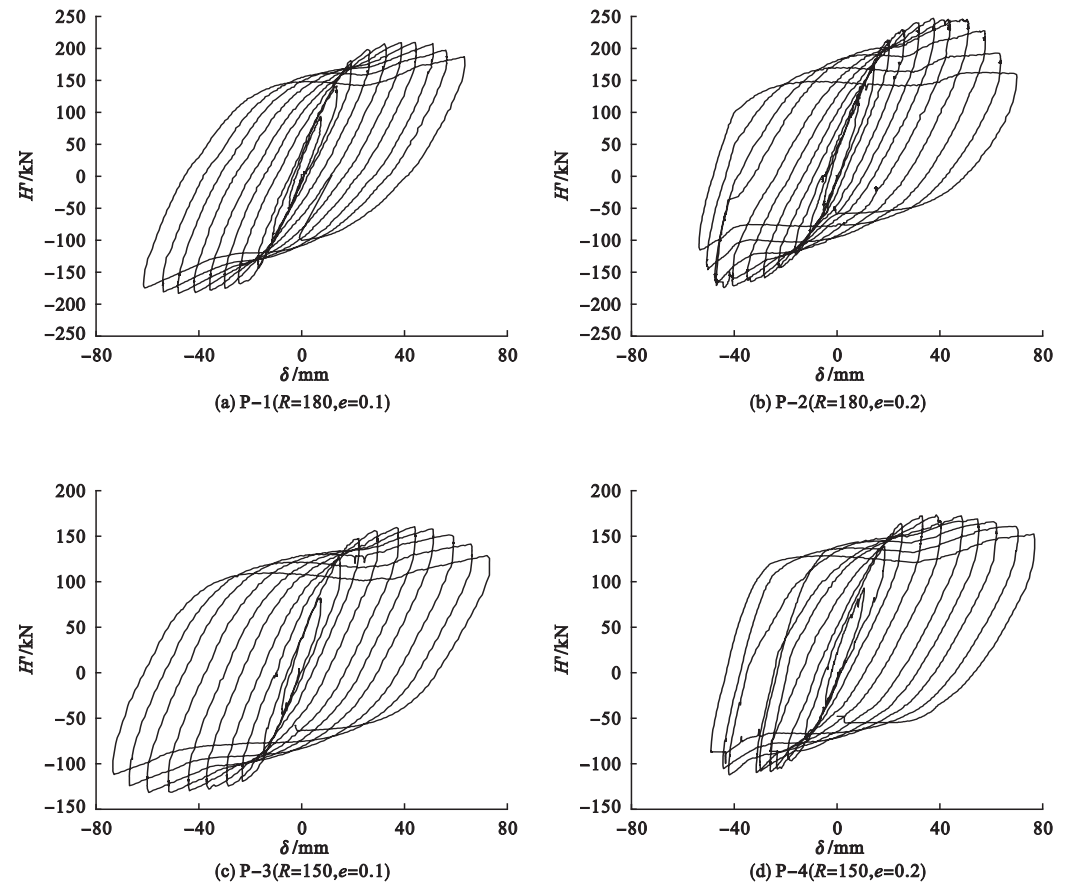


图 16 水平荷载-位移滞回曲线结果

Fig. 16 Horizontal force-displacement hysteretic curves

由图 16(a)可知,试件 P-1 在正方向位移达到 17.8 mm 时达到屈服,此时水平力

为 178 kN,当位移力达到 42.9 mm 时,试件 P-1 达到极限承载力 206 kN;在负方向位移

力达到 $-18.1\text{ mm}$ 时,试件P-1屈服,水平反力为 $-145.5\text{ kN}$ ,位移力达到 $-49.6\text{ mm}$ 时,试件P-1达到极限状态,极限承载力为 $-185\text{ kN}$ .

由图16(b)可知,试件P-2在正方向位移力达到 $16.03\text{ mm}$ 时达到屈服,此时水平力为 $210\text{ kN}$ ,当位移力达到 $46.94\text{ mm}$ 时,试件P-2达到极限承载力 $242\text{ kN}$ ;在负方向位移力达到 $-14.87\text{ mm}$ 时,试件P-2屈服,水平反力为 $-89.5\text{ kN}$ ,位移力达到 $-51.05\text{ mm}$ 时,试件P-2达到极限状态,极限承载力为 $-172\text{ kN}$ .

由图16(c)可知,试件P-3在正方向位移力达到 $14.3\text{ mm}$ 时达到屈服,此时水平力为 $125\text{ kN}$ ,当位移力达到 $43.8\text{ mm}$ 时,试件P-3达到极限承载力 $157.7\text{ kN}$ ;在负方向位移力达到 $-14.7\text{ mm}$ 时,试件P-3屈服,水平反力为 $-88.4\text{ kN}$ ,位移力达到 $-59.4\text{ mm}$ 时,试件P-3达到极限状态,极限承载力为 $-131.8\text{ kN}$ .

由图16(d)可知,试件P-4在正方向位

移力达到 $21.4\text{ mm}$ 时达到屈服,此时水平力为 $163.3\text{ kN}$ ,当位移力达到 $44.9\text{ mm}$ 时,试件P-4达到极限承载力 $172\text{ kN}$ ;在负方向位移力达到 $-22.03\text{ mm}$ 时,试件P-4屈服,水平反力为 $-96.2\text{ kN}$ ,位移力达到 $-52.5\text{ mm}$ 时,试件达到极限状态,极限承载力为 $-112\text{ kN}$ .

分析各试件的水平力-水平位移滞回曲线可知,当在试件根部附近钢管出现局部屈曲变形,随着荷载的增加,由于内填混凝土的存在延缓了局部变形的扩展速度,同时混凝土承担了一部分外荷载作用,承载力达到最大值后下降的速度缓慢,为此填充混凝土的试件表现出极限承载力大、滞回曲线饱满、刚度退化缓慢等特征.

3.3 不同偏心率骨架曲线对比分析

径厚比、长细比等条件均相同试件的荷载-位移骨架曲线对比结果如图17所示.各试件的屈服荷载、屈服位移、极限承载力、极限位移等进行了统计分析并计算得出位移延性系数如表3所示.

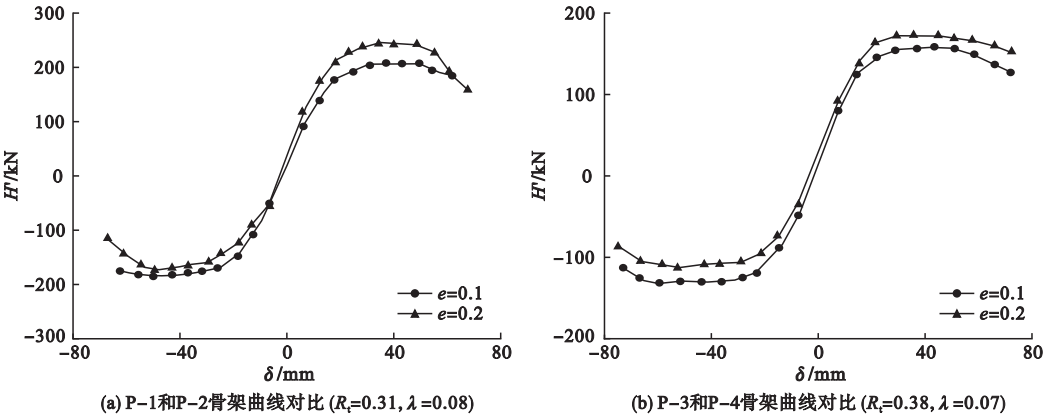


图 17 不同偏心率骨架曲线对比

Fig. 17 Comparison of skeleton curves with different eccentric ratios

由图17和表3可知:①钢桥墩柱偏心和非偏心侧屈服时对应的屈服荷载均不相同,相对应的屈服位移不同,说明竖向偏心荷载的存在使得钢桥墩柱偏心和非偏心侧的受力性能得到了改变.②当试件的径厚比、长细比参数一样时,偏心率对钢桥墩柱的极限承载

能力影响比较明显.随着偏心率越大,桥墩出现的初始水平位移也随着增加.③通过对比各试件的位移延性系数可以看出,每个钢桥墩柱偏心和非偏心侧对应的延性能力均不同,且差距比较明显.

表3 试件力学指标

Table 3 The mechanical index of specimens

试件编号	偏心率	屈服荷载/kN	屈服位移/mm	极限承载力/kN	极限位移/mm	位移延性系数
P-1	0.1	178.0	17.80	206.0	42.90	2.41
	0.1	-145.5	-18.10	-185.0	-49.60	2.74
P-2	0.2	210.0	16.03	242.0	46.94	2.93
	0.2	-89.5	-14.87	-172.0	-51.05	3.43
P-3	0.1	125.0	14.30	157.7	43.80	3.06
	0.1	-88.4	-14.70	-131.8	-59.40	4.04
P-4	0.2	163.3	21.40	172.0	44.90	2.10
	0.2	-96.2	-22.03	-112.0	-52.50	2.38

注:位移延性系数为墩顶极限位移与屈服位移的比值,极限位移为在受压侧的水平承载力已下降到极限承载力的85%以下时测得的位移。

4 结 论

(1)通过分析偏心受压及水平低周往复荷载作用下部分填充混凝土钢桥墩柱试件试验测得的荷载-位移滞回曲线、应变结果,表明内填混凝土对钢桥墩柱试件的承载力和延性性能有很好的补强效果。

(2)竖向偏心荷载的存在使得钢桥墩柱偏心和非偏心侧的受力性能得到了改变.当试件的径厚比、长细比参数相同时,偏心率对钢管柱的承载能力影响比较明显.偏心率越大,桥墩出现的初始水平位移也随着增加.而偏心竖向荷载的存在使得试件在偏心侧的承载力降低了7%~15%,另一侧加强了10%~18%,且偏心率越大,该现象越明显。

参考文献

[1] Japan road association, Specifications for highway bridges; part 5 seismic design[S]. Maruzon, Tokyo, Japan, 2012.

[2] CHEN W F, DUAN L. Bridge Engineering Handbook; Seismic Design[M]. 2nd ed. USA: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2014.

[3] CHARLES W R, DAWN E L. Concrete filled steel bridge piers for improved seismic performance and rapid construction[J]. National and Canadian conference on earthquake engineering, 2010, 8(8): 6149-6158.

[4] 袁辉辉,唐艺航,吴庆雄,等.部分填充混凝土

薄壁带肋箱型钢桥墩拟动力试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2016, 44(6): 504-511.

(YUAN Huihui, TANG Yihang, WU Qingxiong, et al. Pseudo-dynamic test study of partially concrete-filled steel bridge piers with thin-walled ribbed box sections[J]. Journal of hehai university (natural sciences), 2016, 44(6): 504-511)

[5] 王占飞,李雪松,孙宝芸,等.混凝土填充高度对部分填充圆形钢管混凝土桥墩柱抗震性能影响的试验研究[J]. 公路交通科技, 2013, 108(12): 202-217.

(WANG Zhanfei, LI Xuesong, SUN Baoyun, et al. Experimental study on the effect of concrete filling height on seismic performance of partially concrete-filled steel tubular piers[J]. Journal of highway and transportation research and development, 2013, 108(12): 202-217.)

[6] GOTO Y, GHOSH P K, KAWANISHI N. Non-linear finite element analysis for cyclic behavior of thin-walled stiffened rectangular steel columns with in-filled concrete[J]. Journal of structural engineering, 2012, 138(5): 571-584.

[7] WANG Z, SUI W, ZHAO Z, et al. Study on seismic performance of partially concrete-filled steel circular bridge piers with transverse diaphragm[J]. Journal of building structures, 2013, 34: 233-239.

[8] GOTO Y, EBISAWA T, LU X. Local buckling restraining behavior of thin-walled circular CFT columns under seismic loads[J]. Journal of structural engineering, 2014, 140(5): 1-14.

- [9] YUAN H, DANG J, AOKI T. Behavior of partially concrete-filled steel tube bridge piers under bi-directional seismic excitations[J]. Journal of constructional steel research, 2014, 93(2): 44–54.
- [10] WANG Z F, WU Q, SUI W N. Effect of filled-concrete height on ultimate strength and ductility of steel tubular bridge pier with partial filled-concrete [J]. Advanced materials research, 2011(803/806): 368–373.
- [11] 後藤芳顕, 水野貢介, Ghosh Prosenjit Kumar, 等. 充填コンクリートとの相互作用を考慮した矩形断面鋼製橋脚の繰り返し挙動のFEM解析[J]. 土木学会論文集, 2010, 66(4): 816–835.  
(YOSHIAKI Goto, KOSUKE Mizuno, GHOSH P K, et al. FEM analysis for hysteretic behavior of thin-walled stiffened rectangular steel columns with infilled concrete[J]. Structural engineering/earthquake engineering, JSCE, 2010, 66(4): 816–835.)
- [12] 高圣彬, 徐旻洋, 张大旭. 内填部分混凝土箱形截面钢桥墩的延性影响参数[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2014, 46(12): 89–95.  
(GAO Shengbin, XU Minyang, ZHANG Daxu. Parametric study on ductility behavior of partially concrete-filled steel box-section bridge piers[J]. Journal of Harbin institute of technology, 2014, 46(12): 89–95.)
- [13] 王跃东, 高圣彬. 内填部分混凝土箱形截面钢桥墩的滞回性能研究[J]. 四川建筑科学研究, 2012, 38(1): 14–18.  
(WANG Yuedong, GAO Shengbin. Research on the hysteretic behaviors of partially concrete-filled steel box-section bridge piers[J]. Sichuan building science, 2012, 38(1): 14–18)
- [14] 徐旻洋, 高圣彬. 内填部分混凝土钢桥墩延性性能简化计算方法[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2014, 31(3): 9–14.  
(XU Minyang, GAO Shengbin. Simplified numerical method determining ductility behavior of partially concrete-filled steel box-section bridge piers[J]. Journal of Hebei university of engineering (natural science), 2014, 31(3): 9–14.)
- [15] 王占飞, 杨阳, 王强, 等. 部分填充圆形钢管混凝土桥墩子结构拟动力试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2012, 28(3): 437–442.  
(WANG Zhanfei, YANG Yang, WANG Qiang, et al. Pseudo-dynamic sub-structural test for circular steel bridge pier with partially concrete-filled[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2012, 28(3): 437–442.)
- [16] 王占飞, 邱国强, 高彬, 等. 平面内往复荷载作用下竖向偏心圆形钢桥墩的弹塑性性能有限元分析[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34: 611–615.  
(WANG Zhanfei, QIU Guoqiang, GAO Bin, et al. Elasto-plastic behaviors of eccentrically loaded steel circular bridge piers under cyclic in-plane loading [J]. Earthquake engineering and engineering dynamics, 2012, 34: 611–615.)
- [17] 王占飞, 张霞, 李幅昌. 基于延性性能圆形钢桥墩内填混凝土补强填充高度的简易计算方法[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2016, 32(5): 827–837.  
(WANG Zhanfei, ZHANG Xia, LI Guochang. A simple method to calculate the concrete filled height of steel tubular bridge piers with concrete filled based on the ductility performance [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2016, 32(5): 827–837.)
- [18] 王占飞, 隋伟宁, 李幅昌, 等. 水平往复荷载作用下部分填充混凝土圆形钢桥墩柱的力学性能[J]. 中国公路学报, 2015, 28(1): 62–69.  
(WANG Zhanfei, Sui Weining, Li Guochang, et al. Mechanical behavior of partially concrete-filled steel circular bridge piers under cyclic lateral load[J]. China journal of highway and transport, 2015, 28(1): 62–69.)
- [19] 王占飞, 邱国强, 刘可, 等. 竖向偏心部分填充混凝土圆形钢桥墩的抗震性能[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2016, 32(2): 261–270.  
(WANG Zhanfei, QIU Guoqiang, LIU Ke, et al. Study on the seismic performance of partial concrete filled steel tubular bridge pier under the eccentrically vertical load [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2016, 32(2): 261–270.)