

doi: 10. 11830/ISSN. 1000-5013. 201701052



# 设置耗能壁板的新型箱形钢墩柱 轴压性能数值分析

罗俊<sup>1</sup>, 李海锋<sup>1,2</sup>, 韩枫<sup>1</sup>, 李升才<sup>1</sup>

(1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;

2. 华侨大学 福建省结构工程与防灾重点实验室, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 为探讨设置低屈服点加劲耗能壁板对箱形钢墩柱受力性能的影响机理,采用有限元法对 3 类设置加劲耗能壁板的新型箱形钢墩柱轴压性能进行数值分析,并探讨设置加劲耗能壁板对箱形钢墩柱的荷载-位移曲线、位移延性系数及承载能力的影响规律.结果表明:耗能壁板高度及宽度对箱形钢墩柱的承载能力和延性影响较大;构件承载能力随耗能壁板高度增大而增大,但随耗能壁板宽度增大而减小;构件延性随耗能壁板高度及宽度增大而增大;加劲肋的厚度、宽度及设置数量均对箱形钢墩柱的承载能力和延性有一定影响.

**关键词:** 加劲耗能壁板; 新型箱形钢墩柱; 延性; 承载能力

中图分类号: TU 391

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2017)06-0792-07

## Numerical Analysis of New Steel Box Pier With Energy Dissipation Plates Under Axial Compression

LUO Jun<sup>1</sup>, LI Haifeng<sup>1,2</sup>, HAN Feng<sup>1</sup>, LI Shengcai<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. Key Laboratory for Structure Engineering and Disaster Prevention of Fujian Province,  
Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** In order to investigate the effect of the low yield point stiffening energy dissipation plates on the mechanical behavior of steel box piers under axial compression, three types of the new steel box piers with different stiffening energy dissipation plates were analyzed using the finite element method. The influences of stiffening energy dissipation plates on load-displacement curves, displacement ductility coefficient and bearing capacity of the steel box piers were discussed. The results show that the height and width of the energy dissipation plates greatly influence the load capacity and the ductility of those steel box piers. The load capacity of the steel box piers is positive correlated to the height of energy dissipation plates, but is negative correlated to the width of the plates. The ductility of the steel box piers is positive correlated to both the height and width of the energy dissipation plates. The effects of the thickness, width and the setting numbers of the energy dissipation plates on the loading capacity and ductility of the steel box piers are obvious.

**Keywords:** stiffening energy dissipation plates; new steel box piers; ductility; load capacity

钢结构中的箱形钢墩柱不仅具有较好的抗弯刚度和抗扭刚度,而且重量轻、刚度大、造价低,具有明

收稿日期: 2017-01-25

通信作者: 李海锋(1983-),男,副教授,博士,主要从事钢结构抗震性能的研究. E-mail: lihaifeng@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51408240);福建省泉州市科技计划项目(2015Z142);福建省泉州市校地协同创新专项资助项目(2015Z143);华侨大学中青年教师科研提升资助计划(ZQN-PY312);华侨大学研究生科研创新能力培育计划资助项目(1611304025)

显的经济效益. 但箱形钢墩柱的壁板较薄, 在地震中箱形钢墩柱根部壁板易发生局部屈曲变形, 致使箱形钢墩柱的抗震性能急剧恶化. 因此, 国内外学者对钢墩柱的结构和材料进行了新的开发<sup>[1-6]</sup>. 目前, 研究较多的是采用加劲肋加固箱形截面钢墩柱, 使钢墩柱的延性大为改善<sup>[7-10]</sup>. 基于此, 本文提出一种震后功能可恢复的新型箱形钢墩柱, 并对其受力性能进行数值分析.

## 1 对比试验概况

采用华侨大学 10 MN 微机控制电液伺服压剪试验机, 在弹性阶段用力加载进行控制, 最后用位移加载控制进行轴压试验. 轴压试件在四面壁板上开洞, 将低屈服点钢板与壁板焊接, 并在低屈服点钢板上设置不同形式的加劲肋, 如图 1 所示. 试件破坏形态, 如图 2 所示.

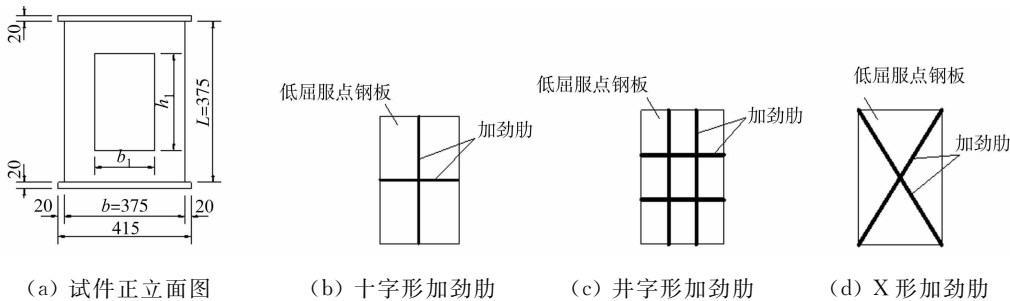


图 1 试件示意图 (单位: mm)

Fig. 1 Schematic diagram of specimen (unit: mm)

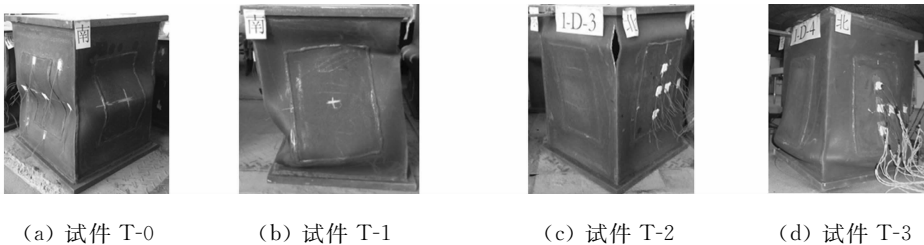


图 2 试件破坏形态

Fig. 2 Failure mode of specimens

柱的高度  $L$  为 500 mm; 柱截面的高度  $h$  和宽度  $b$  都为 375 mm, 不同加劲肋类型的组样 T-0~T-3 的箱形钢墩柱试件参数, 如表 1 所示. 表 1 中:  $b_1$  为耗能壁板宽度;  $h_1$  为耗能壁板高度; 十字形及井字形加劲肋中,  $t_{w,1}$  为横向加劲肋厚度,  $t_{w,2}$  为竖向加劲肋厚度; X 形加劲肋中,  $t_{w,1}$ ,  $t_{w,2}$  分别表示一块加劲肋厚度;  $t_f$  为箱形钢墩柱四面薄壁及低屈服板的厚度;  $h_2$  为加劲肋宽度.

表 1 试验试件设计参数

Tab. 1 Parameters of test specimens mm

| 组样  | $h_1$ | $b_1$ | $t_{w,1}$ | $t_{w,2}$ | $t_f$ | $h_2$ | 加劲肋类型   |
|-----|-------|-------|-----------|-----------|-------|-------|---------|
| T-0 | 300   | 188   | —         | —         | 8     | —     | 无加劲肋    |
| T-1 | 300   | 188   | 8         | 8         | 8     | 60    | 十字形加劲肋  |
| T-2 | 300   | 188   | 8         | 8         | 8     | 60    | 井字形加劲肋  |
| T-3 | 300   | 188   | 8         | 8         | 8     | 60    | X 字形加劲肋 |

## 2 有限元模型

### 2.1 有限元模型

根据对比试验试件几何尺寸, 采用 ANSYS 有限元软件建立相应的计算模型. 有限元模型采用四节点六自由度板壳单元 Shell 181, 约束四壁板底部的 3 个方向形成柱底刚性连接, 约束柱顶端板  $X, Y$  两个方向, 对  $Z$  方向进行位移控制, 从而均匀施加等效面荷载. 以单元大小 15 mm 为控制参数, 划分箱形钢墩柱, 有限元网格接近正方形, 如图 3 所示.

有限元模型的基本钢材为 Q345, 低屈服点钢材为 Q160, 弹性模量  $E$  均为 206 GPa, 泊松比均为 0.3, 应力-应变关系均采用理想两折线模型. 有限元模型中的加劲肋的建模同壁板, 加劲肋与低屈服板满焊连接, 可以通过重合相应的连接

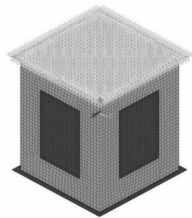


图 3 有限元模型

Fig. 3 Model of finite element

节点实现.

2.2 有限元模型与试验结果比较

在柱顶竖向位移加载作用下,部分试件的试验和有限元分析荷载-位移曲线图,如图 4 所示.图 4 中: $P$  为作用于试件柱顶的竖向荷载; $\Delta$  为对应的柱顶竖向位移.

由图 4 可知:有限元分析结果与试验结果吻合较好,能反映出竖向荷载作用下箱形钢墩柱的受力特征.为此,采用有限元分析方法进一步研究耗能壁板高度和宽度、加劲肋的厚度和宽度及设置数量等因素对箱形钢墩柱的受力性能的影响规律.

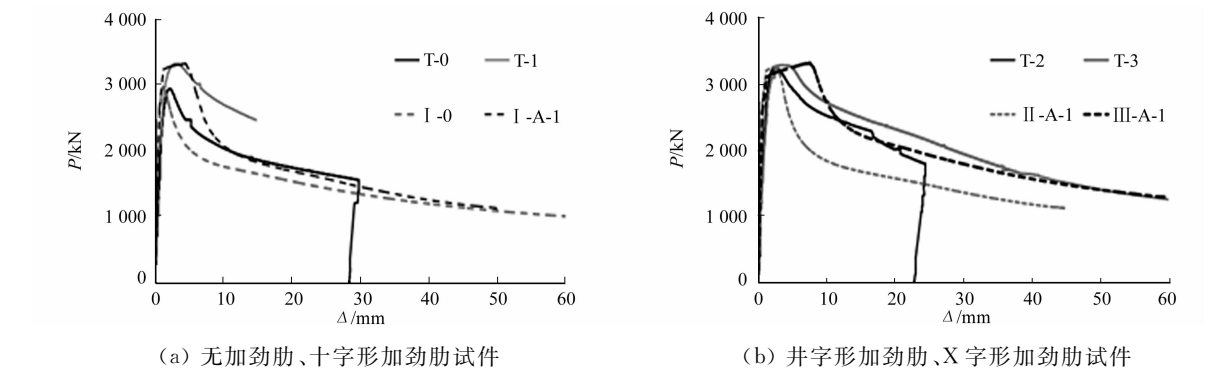


图 4 试验和有限元分析荷载-位移曲线

Fig. 4 Load-displacement curves of experiments and finite element analysis

3 不同类型的加劲肋对比分析

3.1 数值分析试件设计

柱的高度  $L$  为 500 mm;柱截面的高度  $h$  和宽度  $b$  都为 375 mm.数值分析下设置加劲耗能壁板的箱形钢墩柱试件的参数,如表 2 所示.表 2 中: I-0 为无加劲肋; I 组其他试件为十字形加劲肋, I-F 组试件设置不同数量加劲肋; II 组试件为井字形加劲肋; III 组试件为 X 字形加劲肋.

表 2 数值分析试件设计参数

| Tab. 2 Parameters of analysis specimens |       |       |           |           |       |       | mm      |       |       |           |           |       |       |
|---|-------|-------|-----------|-----------|-------|-------|---------|-------|-------|-----------|-----------|-------|-------|
| 组样                                      | $h_1$ | $b_1$ | $t_{w,1}$ | $t_{w,2}$ | $t_f$ | $h_2$ | 组样      | $h_1$ | $b_1$ | $t_{w,1}$ | $t_{w,2}$ | $t_f$ | $h_2$ |
| I-0                                     | 300   | 188   | —         | —         | 8     | —     | I-F-2   | 300   | 188   | 8         | 8         | 8     | 60    |
| I-A-1                                   | 300   | 188   | 8         | 8         | 8     | 60    | I-F-3   | 300   | 188   | 8         | 8         | 8     | 60    |
| I-B-1                                   | 200   | 188   | 8         | 8         | 8     | 60    | I-F-4   | 300   | 188   | 8         | 8         | 8     | 60    |
| I-B-2                                   | 250   | 188   | 8         | 8         | 8     | 60    | II-A-1  | 300   | 188   | 8         | 8         | 8     | 60    |
| I-B-3                                   | 350   | 188   | 8         | 8         | 8     | 60    | III-A-1 | 300   | 188   | 8         | 8         | 8     | 60    |
| I-B-4                                   | 400   | 188   | 8         | 8         | 8     | 60    | III-B-1 | 200   | 188   | 8         | 8         | 8     | 60    |
| I-C-1                                   | 300   | 125   | 8         | 8         | 8     | 60    | III-B-2 | 250   | 188   | 8         | 8         | 8     | 60    |
| I-C-2                                   | 300   | 156   | 8         | 8         | 8     | 60    | III-B-3 | 350   | 188   | 8         | 8         | 8     | 60    |
| I-C-3                                   | 300   | 220   | 8         | 8         | 8     | 60    | III-B-4 | 400   | 188   | 8         | 8         | 8     | 60    |
| I-C-4                                   | 300   | 250   | 8         | 8         | 8     | 60    | III-C-1 | 300   | 125   | 8         | 8         | 8     | 60    |
| I-D-1                                   | 300   | 188   | 12        | 8         | 8     | 60    | III-C-2 | 300   | 156   | 8         | 8         | 8     | 60    |
| I-D-2                                   | 300   | 188   | 16        | 8         | 8     | 60    | III-C-3 | 300   | 220   | 8         | 8         | 8     | 60    |
| I-D-3                                   | 300   | 188   | 20        | 8         | 8     | 60    | III-C-4 | 300   | 250   | 8         | 8         | 8     | 60    |
| I-D-4                                   | 300   | 188   | 8         | 12        | 8     | 60    | III-D-1 | 300   | 188   | 12        | 12        | 8     | 60    |
| I-D-5                                   | 300   | 188   | 8         | 16        | 8     | 60    | III-D-2 | 300   | 188   | 16        | 16        | 8     | 60    |
| I-D-6                                   | 300   | 188   | 8         | 20        | 8     | 60    | III-D-3 | 300   | 188   | 20        | 20        | 8     | 60    |
| I-E-1                                   | 300   | 188   | 8         | 8         | 8     | 70    | III-E-1 | 300   | 188   | 8         | 8         | 8     | 70    |
| I-E-2                                   | 300   | 188   | 8         | 8         | 8     | 80    | III-E-2 | 300   | 188   | 8         | 8         | 8     | 80    |
| I-E-3                                   | 300   | 188   | 8         | 8         | 8     | 90    | III-E-3 | 300   | 188   | 8         | 8         | 8     | 90    |
| I-F-1                                   | 300   | 188   | 8         | 8         | 8     | 60    |         |       |       |           |           |       |       |

为定量分析试件延性大小,引入延性系数<sup>[11]</sup>,其计算公式为 $\mu=\Delta_{85\%}/\Delta_{75\%}$ .式中: $\Delta_{85\%}$ 为承载力下降到极限承载力的 85%时,对应的位移值; $\Delta_{75\%}$ 为承载力在峰值点前段中达到极限承载力的 75%时,对应的位移值.

3.2 十字形加劲肋

3.2.1 不同耗能壁板高度 设置十字形加劲肋试件不同耗能壁板高度  $h_1$  下的荷载-位移曲线、延性系数及最大荷载对比图,如图 5 所示.由有限元模拟及延性系数计算公式计算结果可知:随着  $h_1$  的增大,试件承载力逐渐增大,但  $h_1$  值增大到一定值后,试件承载力增大不明显,试件延性系数也逐渐提高,但  $h_1$  值增大到一定值后,试件延性系数反而有所减小.

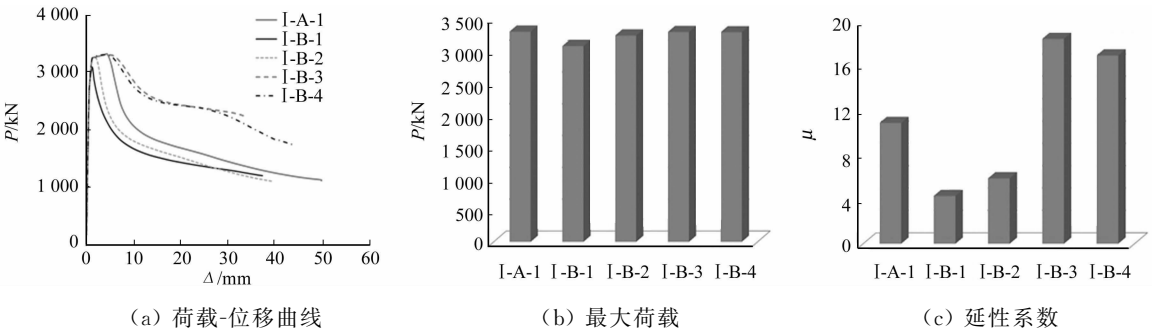


图 5 耗能壁板高度对试件受力性能的影响

Fig. 5 Influence of energy dissipation panel height on mechanical properties of specimens

3.2.2 不同耗能壁板宽度 设置十字形加劲肋试件不同耗能壁板宽度  $b_1$  下的荷载-位移曲线、延性系数及最大荷载对比图,如图 6 所示.由有限元模拟及延性系数计算公式计算结果可知:随着  $b_1$  的增大,试件承载力逐渐减小,试件延性系数逐渐提高.

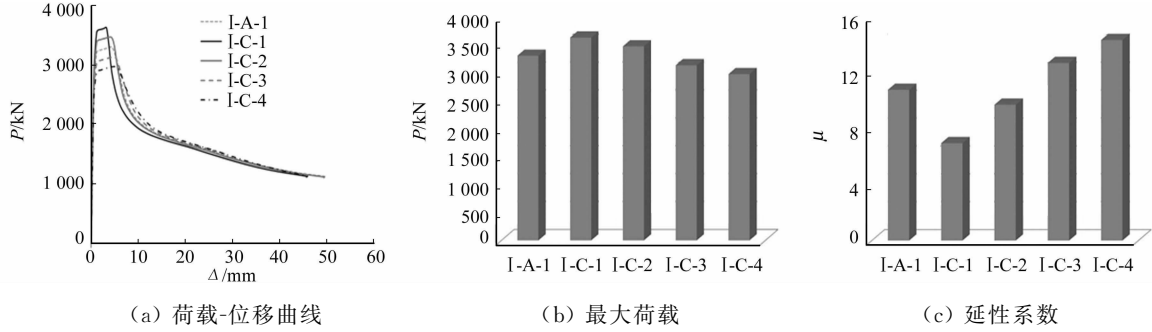


图 6 耗能壁板宽度对试件受力性能的影响

Fig. 6 Influence of energy dissipation panel width on mechanical properties of specimens

3.2.3 不同加劲肋厚度 设置十字形加劲肋试件不同加劲肋厚度下的荷载-位移曲线、延性系数及最大荷载对比图,如图 7 所示.由有限元模拟及延性系数计算公式计算结果可知:随着十字形加劲肋中横向加劲肋厚度  $t_{w,1}$  的增大,试件承载力变化不大,但试件延性系数有所提高;随着十字形加劲肋中竖向加劲肋厚度  $t_{w,2}$  的增大,试件承载力逐渐增大,但试件延性系数有所减小.

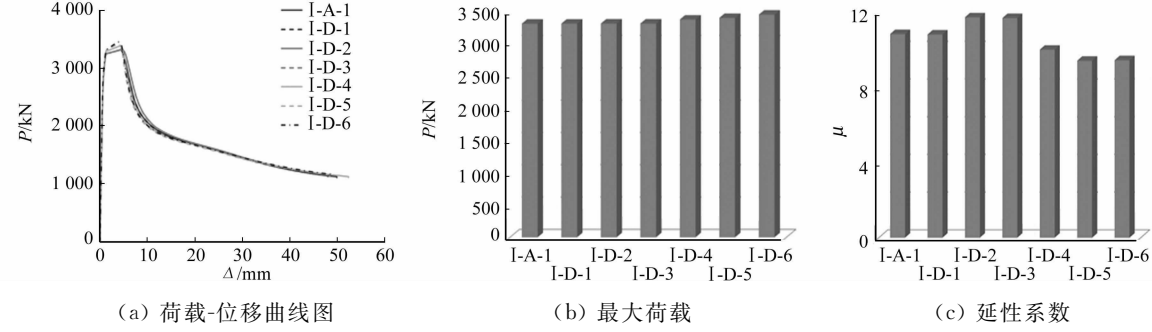


图 7 十字形加劲肋厚度对试件受力性能的影响

Fig. 7 Influence of thickness of cross rib on mechanical properties of specimens

3.2.4 不同加劲肋宽度 设置十字形加劲肋试件不同加劲肋宽度  $h_2$  下的荷载-位移曲线、延性系数及最大荷载对比图,如图 8 所示.由有限元模拟及延性系数计算公式计算结果可知:随着  $h_2$  的增大,试件承载力有所增加,但是增加幅度不大,随着  $h_2$  的增大,试件延性系数的变化不大.

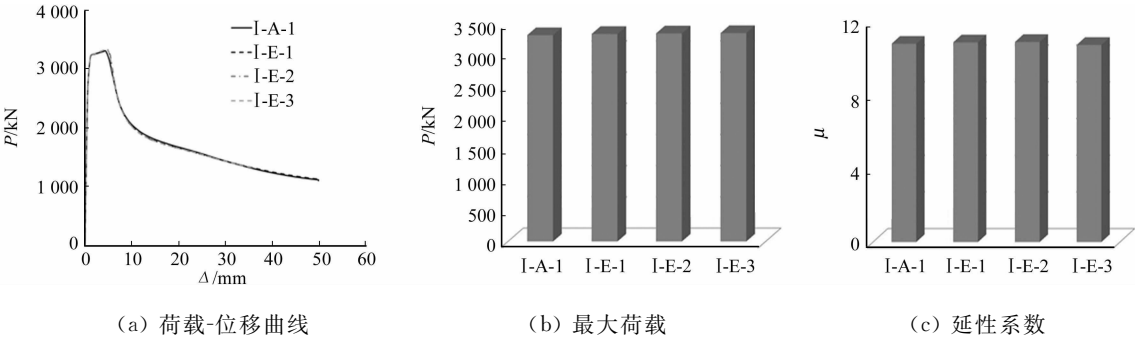


图 8 十字形加劲肋宽度对试件受力性能的影响

Fig. 8 Influence of width of cross rib on mechanical properties of specimens

3.2.5 不同加劲肋数量 设置十字形加劲肋试件不同加劲肋数量下的荷载-位移曲线、延性系数及最大荷载对比图,如图 9 所示.图 9 中:试件 I-F-1, I-F-2 分别为设置两、三块竖向加劲肋;试件 I-F-3, I-F-4 分别为设置两、三块横向加劲肋.

由有限元模拟及延性系数计算公式计算结果可知:随着设置横向加劲肋数量的增加,试件承载力的变化不大,但试件延性系数反而有所减小;随着设置竖向加劲肋数量的增加,试件承载力有大幅的提高,但试件延性系数有所降低.

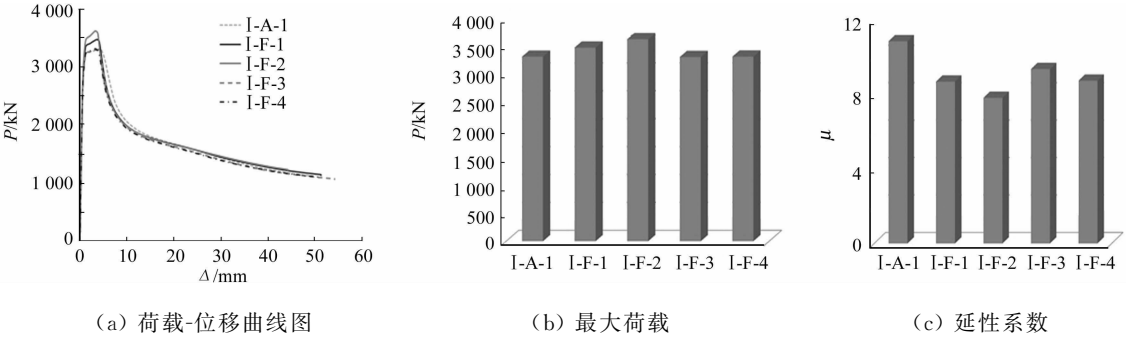


图 9 十字形加劲肋设置数量对试件受力性能的影响

Fig. 9 Influence of number of cross rib on mechanical properties of specimens

3.3 X 形加劲肋

3.3.1 不同耗能壁板高度 设置 X 形加劲肋试件不同耗能壁板高度  $h_1$  下的荷载-位移曲线、延性系数及最大荷载对比图,如图 10 所示.由有限元模拟及延性系数计算公式计算结果可知:随着  $h_1$  的增大,试件承载力逐渐增大,但  $h_1$  值增大到一定值后,试件承载力增大不明显,随着  $h_1$  的增大,试件延性系数逐渐提高.

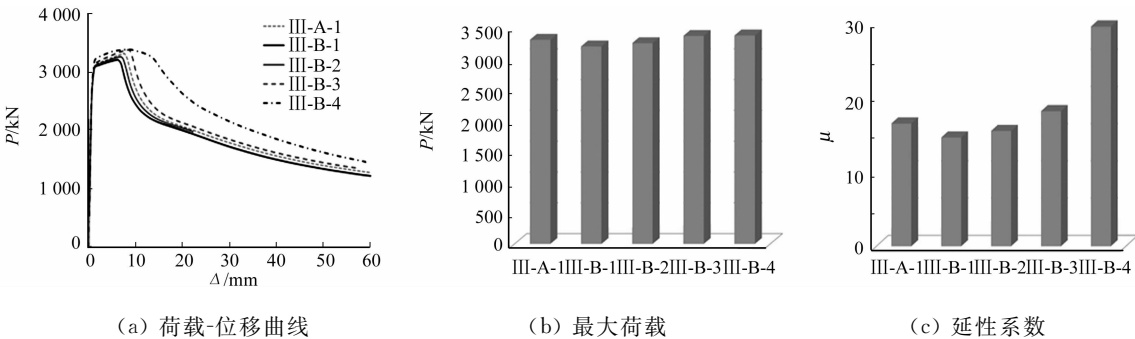


图 10 耗能壁板高度对试件受力性能的影响

Fig. 10 Influence of energy dissipation panel height on mechanical properties of specimens

3.3.2 不同耗能壁板宽度 设置 X 形加劲肋试件不同耗能壁板宽度  $b_1$  下的荷载-位移曲线、延性系数及最大荷载对比图,如图 11 所示.由有限元模拟及延性系数计算公式计算结果可知:随着  $b_1$  的增大,试件承载力逐渐减小,试件延性系数逐渐提高.

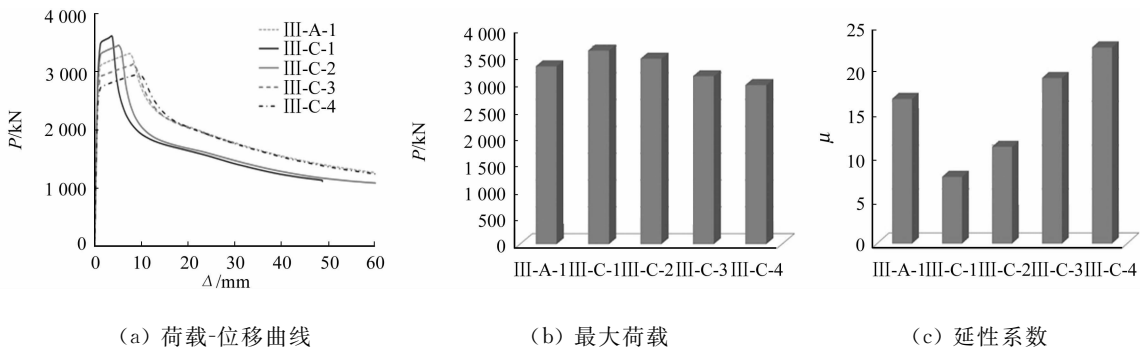


图 11 耗能壁板宽度对试件受力性能的影响

Fig. 11 Influence of energy dissipation panel width on mechanical properties of specimens

3.3.3 不同加劲肋厚度 设置 X 形加劲肋试件不同加劲肋厚度  $t_{w,1}, t_{w,2}$  下的荷载-位移曲线、延性系数及最大荷载对比图,如图 12 所示.由有限元模拟及延性系数计算公式计算结果可知:随着  $t_{w,1}, t_{w,2}$  的增大,试件承载力逐渐增大,但是增大幅度不明显;随着  $t_{w,1}, t_{w,2}$  的增大,试件延性系数有所减小.

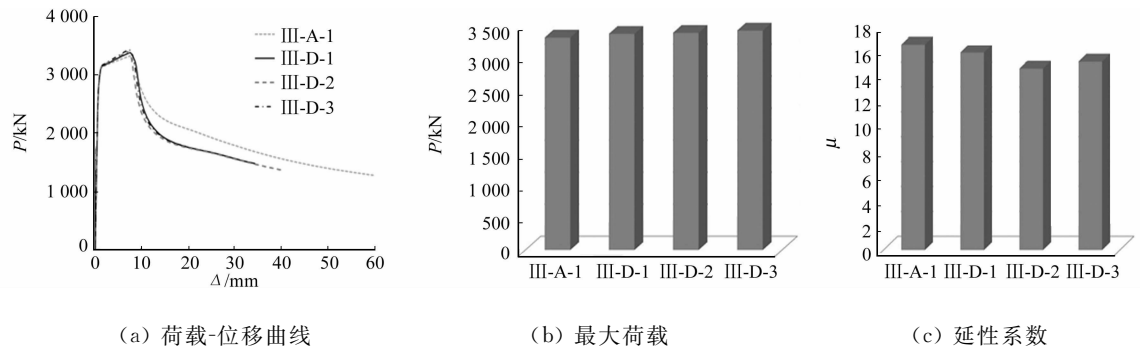


图 12 X 形加劲肋厚度对试件受力性能的影响

Fig. 12 Influence of the thickness of X rib on mechanical properties of specimens

3.3.4 不同加劲肋宽度 设置 X 形加劲肋试件不同加劲肋宽度  $h_2$  下的荷载-位移曲线、延性系数及最大荷载对比图,如图 13 所示.由有限元模拟及延性系数计算公式计算结果可知:随着  $h_2$  的增大,试件承载力有所增加,但是增加幅度不大;随着  $h_2$  的增大,试件延性系数变化不大.

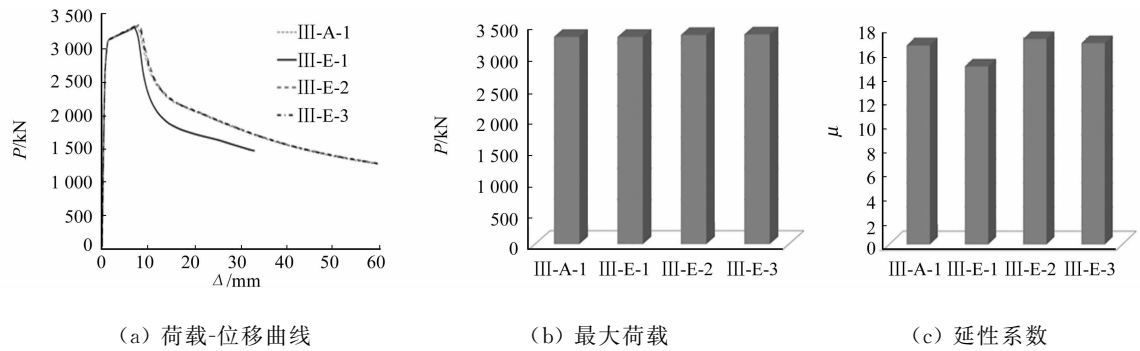


图 13 X 形加劲肋宽度对试件受力性能的影响

Fig. 13 Influence of width of X rib on mechanical properties of specimens

3.4 不同类型加劲肋

设置不同类型加劲肋试件的荷载-位移曲线图、延性系数及最大荷载对比图,如图 14 所示.由有限元模拟及延性系数计算公式计算结果可知:试件中设置加劲肋的 3 个试件承载力较为接近, X 形加劲肋试件比十字形和井字形加劲肋试件的延性性能好;与未设置加劲肋试件相比,设置加劲肋后试件的承载能力和延性均有较大提高.

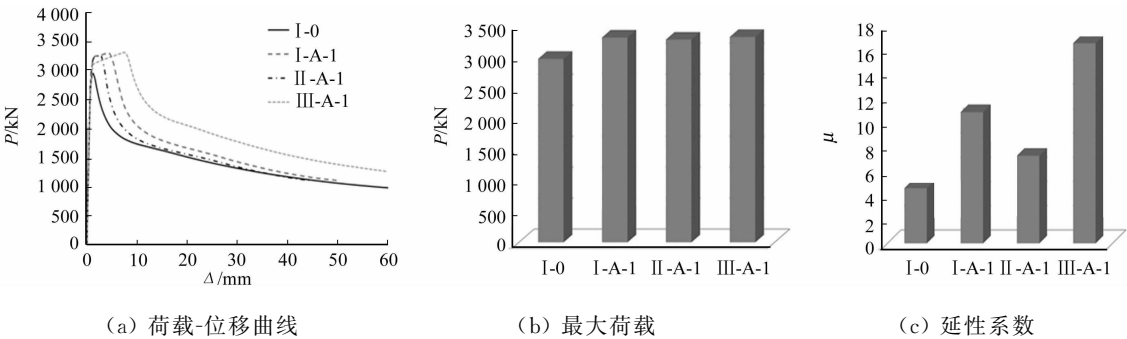


图 14 不同类型的加劲肋试件对试件受力性能的影响  
Fig. 14 Influence of different types of stiffener specimens on mechanical properties of specimens

4 结论

- 1) 加劲耗能壁板的设置能提高箱形钢墩柱的承载力和延性;设置 3 种不同类型加劲肋对构件承载力的影响较小,而对于构件延性性能设置 X 形加劲肋比设置十字形或井字形加劲肋提高的幅度更大.
- 2) 对于设置十字加劲肋耗能壁板的箱形钢墩柱,构件承载力随耗能壁板高度  $h_1$ 、竖向加劲肋板厚度  $t_{w,2}$ 、加劲肋板宽度  $h_2$  及竖向加劲肋数量的增大而增大;但随耗能壁板宽度  $b_1$  的增大而减小. 构件延性随耗能壁板高度  $h_1$ 、宽度  $b_1$ 、横向加劲肋厚度  $t_{w,1}$  的增大而增大;但随竖向加劲肋厚度  $t_{w,2}$  及加劲肋数量的增大而减小.
- 3) 对于设置 X 形加劲肋耗能壁板的箱形钢墩柱,构件承载力随耗能壁板高度  $h_1$ 、加劲肋厚度  $t_{w,1}$ ,  $t_{w,2}$  及加劲肋宽度  $h_2$  的增大而增大;但随耗能壁板宽度  $b_1$  的增大而减小. 构件延性随耗能壁板高度  $h_1$  和宽度  $b_1$  的增大而增大,但随加劲肋厚度  $t_{w,1}$ ,  $t_{w,2}$  的增大而减小.

参考文献:

[1] USAMI T,GE H B. Ductility of concrete-filled steel box column under cyclic loading[J]. Journal of Structural Engineering,1994,120(7):2021-2040. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9445(1994)120:7(2021).

[2] GE H B,USAMI T. Cyclic tests of concrete-filled steel box columns[J]. Journal of Structural Engineering,1996,122(10):1169-1177. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9445(1996)122:10(1169).

[3] USAMI T,GE H B,SAIZUKA K. Behavior of partially concrete-filled steel bridge piers under cyclic and dynamic loading[J]. Journal of Constractional Steel Research,1998,41(2):121-136. DOI:10.1016/S0143-974X(97)00007-2.

[4] GE H B,SUSANTHA K A S,SATAKE Y,et al. Seismic demand predictions of concrete-filled steel box columns [J]. Engineering Structures,2003,25(3):337-345. DOI:10.1016/S0141-0296(02)00162-1.

[5] 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. DOI:10.3969/j. issn. 1008-1933. 2012. 01. 004.

[6] SUSANTHA K A S,AOKI T,KUMANO T,et al. Applicability of low-yield-strength steel for ductility improvement of steel bridge piers[J]. Engineering Structures,2005,27(7):1064-1073.

[7] ISMAIL R E S,FATHELBAD F A,ELDIN H,et al. Numerical investigations on dynamic performance of stiffened box steel bridge piers[J]. International Journal of Steel Structures,2012,12(2):139-155.

[8] GE H B,USAMI T. Cyclic tests of concrete-filled steel box columns[J]. Journal of Structural Engineering,1996,122(10):1169-1177. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9445(1996)122:10(1169).

[9] 吉伯海,高圣彬. 钢桥抗震与损伤控制设计指南(基础篇)[M]. 南京:河海大学出版社,2008.

[10] CHEN Shengjin,CHEN Jie. Steel bridge columns with pre-selected plastic zone for seismic resistance[J]. Thin-Walled Structures,2009,47(1):31-38. DOI:10.1016/j. tws. 2008. 04. 007.

[11] TAO Zhong,HAN Linhai. Behaviour of fire-exposed concrete-filled steel tubular beam column repaired with CFRP wraps[J]. Thin-Walled Structures,2007,45(1):63-76. DOI:10.1016/j. tws. 2006. 11. 004.

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 方德平)