

Experimental Study on Seismic Behavior of Concrete Box Columns Based on the Change of Steel Reinforcement Ratio

Wei Geng*, Fan Liu

School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou Jiangsu
Email: *xg050337@163.com

Received: Oct. 22nd, 2018; accepted: Nov. 12th, 2018; published: Nov. 19th, 2018

Abstract

Based on the horizontal pseudo-static tests of two box-section columns with different reinforcement ratios under constant axial compression, the seismic performance of box-section columns with different reinforcement ratios is analyzed in this paper. The test results show that when the reinforcement ratio varies from 1.58% to 2.21%, the increase of reinforcement ratio can obviously prove the energy dissipation capacity and the maximum bearing capacity of the specimens, but it can obviously reduce the ductility of the specimens.

Keywords

Box Columns, Reinforcement Ratio, Seismic Behavior, Experimental Study

基于配筋变化下的混凝土箱型柱 抗震性能试验研究

耿 伟*, 刘 凡

苏州科技大学, 土木工程学院, 江苏 苏州
Email: *xg050337@163.com

收稿日期: 2018年10月22日; 录用日期: 2018年11月12日; 发布日期: 2018年11月19日

摘 要

本文基于对2个配筋变化的箱型截面柱恒定轴压下的水平拟静力试验的研究, 分析了配筋变化对箱型截
*通讯作者。

面柱的抗震性能的影响。试验结果显示: 当配筋率在1.58%~2.21%之间变化时, 配筋率的增大明显提升试件的耗能能力和最大承载力, 但是会明显降低试件的延性。

关键词

箱型柱, 配筋率, 抗震性能, 试验研究

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

钢筋混凝土结构以其优异的耐火性、整体性以及可模性等土木工程中得到广泛应用, 然而这种结构因为自重大的缺点极大地限制了它的应用范围。与实心柱相比, 箱型柱用较少的材料即可获得较大的承载力, 且延性更高, 使得箱型柱在工程中得到广泛的应用。但是, 目前国内外对此种类型的构件的相关试验研究不多, 所以对箱型截面柱进行试验研究是很有必要的。

本文通过试验分析研究了纵筋配筋率对钢筋混凝土箱形截面柱抗震性能的影响, 这对充实相关理论以及规范具有一定的参考价值。

2. 试件模型参数

本次拟静力试验的试件尺寸参考了中国陕西省的葫芦河特大桥, 大桥主桥桥墩高 9 m, 其截面为箱型, 尺寸为 4.0 m × 6.5 m。短边长度及壁厚分别为 4.0 m、0.7 m, 长边长度及壁厚分别为 6.5 m、0.7 m。将实际桥墩的截面尺寸等比例缩小为原来的 1/10 即为试件的截面尺寸, 试件模型参数及材料性能表如下表 1~3 所示。

本文统计了文献[1]-[8]中的试验及模拟, 并结合我国桥梁抗震设计细则[9]规定的纵向钢筋配筋率设计出了 2 种配筋不同的钢筋混凝土箱型柱。配筋图如下图 1 所示。

Table 1. Parameters of model specimens

表 1. 试件模型参数

| 编号 | 截面尺寸/mm | | | | 纵筋 | 箍筋 | 暗柱 | 拉结筋 | 高度 | 长细比 | 轴压比 | 混凝土强度 | |
|---------|---------|------|------|------|-------|-------|--------|-------|-------|------|-----|-------|-----|
| | 截面长度 | 截面宽度 | 翼缘厚度 | 腹板厚度 | 配筋率/% | 间距/mm | 体积配箍率% | 间距/mm | 间距/mm | | | | mm |
| RCBC-SR | 650 | 400 | 70 | 70 | 2.21 | 70 | 1.66 | 70 | 200 | 1600 | 11 | 0.1 | C40 |
| RCBC-SS | 650 | 400 | 70 | 70 | 1.58 | 70 | 1.66 | / | 200 | 1600 | 11 | 0.1 | C40 |

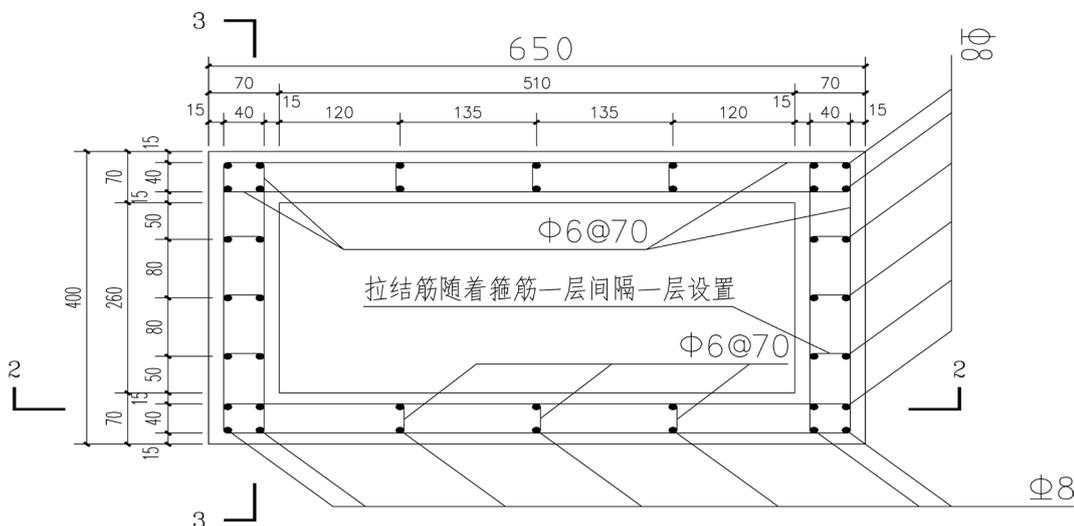
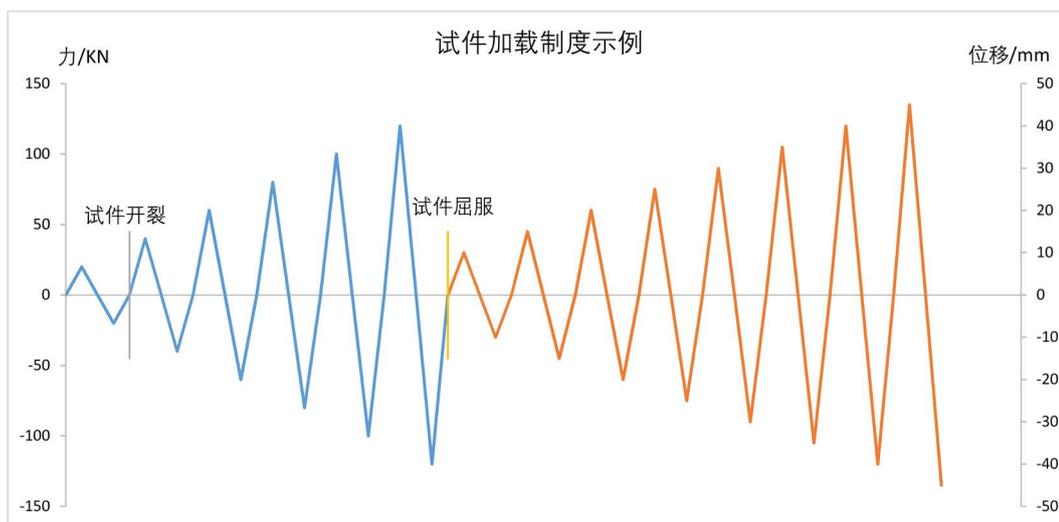
Table 2. Material Properties of reinforcing bar

表 2. 钢筋材料性能表

| 钢筋种类 | 直径/mm | 屈服强度 f_y (MPa) | 极限强度 f_u (MPa) | 弹性模量 $E \times 10^5$ (MPa) |
|--------|-------|------------------|------------------|----------------------------|
| HRB335 | 8 | 400 | 600 | 2.08 |
| | 6 | 335 | 420 | 2.06 |

Table 3. Material Properties of concrete**表 3.** 混凝土材料性能表

| 混凝土等级 | 立方体抗压强度 $f_{cu,k}$ (MPa) | 轴心抗压强度 f_{ck} (MPa) | 轴心抗拉强度 f_{tk} (MPa) | 弹性模量 $E \times 10^4$ (MPa) |
|-------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|
| C40 | 38.57 | 25.80 | 2.39 | 3.25 |

**Figure 1.** Reinforcing figure of RCBC-SS**图 1.** RCBC-SS 配筋图**Figure 2.** Loading case**图 2.** 试件加载方案

3. 试验加载方案简述及结果分析

3.1. 加载方案简述

力(荷载)—位移控制的方法: 试件开裂前按 20 kN/40 s 逐级加载, 开裂后按 10 kN/20 s 逐级加载并循环三次直至屈服, 屈服后按屈服位移的 0.2 倍逐级加载, 当极限承载力下降为最大承载力的 10%~15%时, 对试件停止加载。上图 2 展示了以 RCBC-SS 为例的加载过程。

3.2. 试验结果分析

通过对试验数据的分析, 本节将从延性、承载力、刚度退化以及耗能能力这几个方面展开论述。

3.2.1. 滞回曲线特征概述

滞回曲线是研究结构或构件抗震性能的重要工具, 是体现结构或构件抗震性能的综合性能指标, 也是研究延性、承载力、刚度退化以及耗能能力的基础。

试验所得滞回曲线如下图 3 中的(a), (b)所示。

观察上图所示的滞回曲线可得:

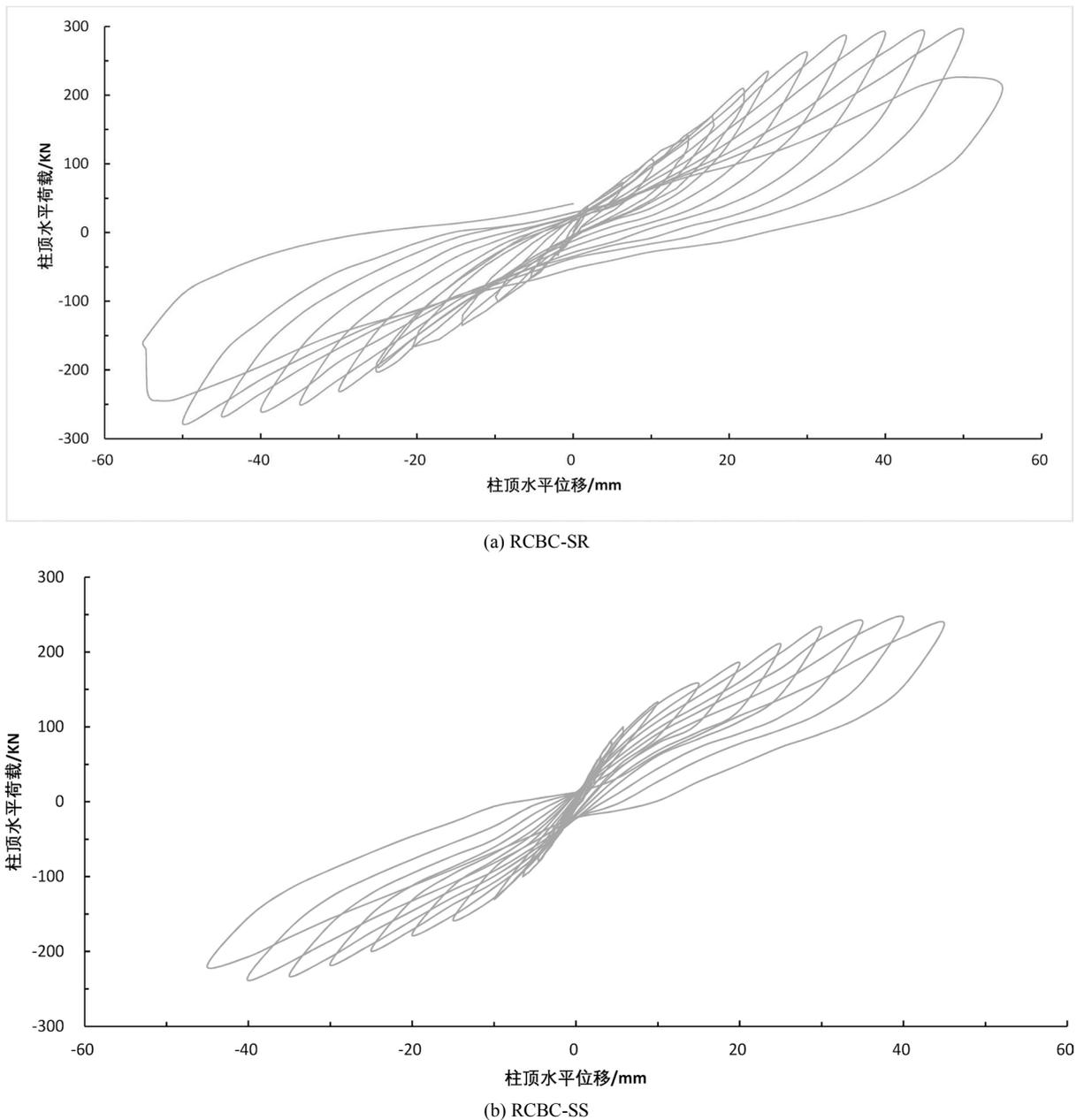


Figure 3. Hysteresis curve of specimens

图 3. 各试件滞回曲线

- 1) 相比 RCBC-SS, RCBC-SR 每级循环荷载下的滞回环面积均有所增大, 滞回曲线更为饱满;
- 2) 两者均有较长的屈服平台;
- 3) 在下降段, RCBC-SR 承载力的变化幅度大于 RCBC-SS。

3.2.2. 骨架曲线特征概述

将每一级加载得到的滞回环上荷载最大的点连接起来所形成的包络线即为骨架曲线。骨架曲线集中体现了试件的承载能力和延性。

各试件骨架曲线对比图如下图 4 所示。

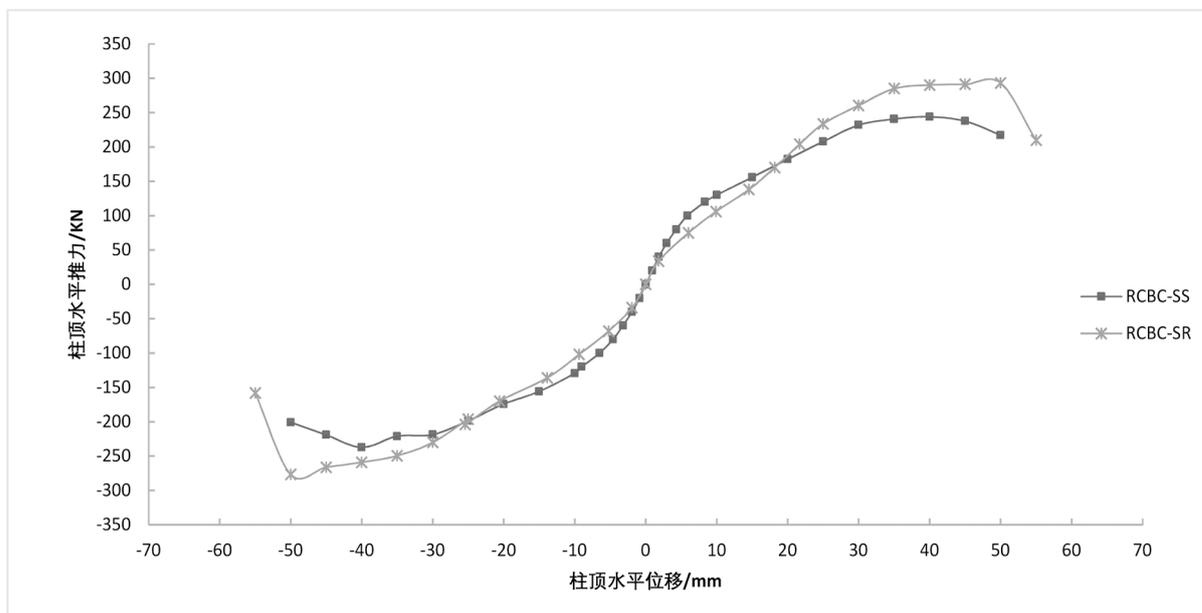


Figure 4. Skeleton curve of specimens

图 4. 各试件骨架曲线对比图

从图中可以看出:

- 1) 试件屈服前, SS 和 SR 的曲线几乎重合, 试件进入屈服后, SR 的割线刚度明显高于 SS;
- 2) 屈服后, 试件 SR 的屈服平台明显高于 SS;
- 3) 在下降段, SR 和 SS 的极限荷载基本相同, 但由于 SR 的最大承载力远大于 SS, 所以 SR 承载力的下降幅度远大于 SS。

3.2.3. 延性

结构或构件的延性一般通过无量纲参数位移延性系数定量地表示, 位移延性系数越大说明试件的延性性能越好, 位移延性系数的定义为:

$$\mu = \Delta u / \Delta y$$

Δy 为屈服位移, 取纵筋屈服时对应的位移, Δu 为极限位移, 取承载力降为最大承载力的 85% 时对应的位移, 各试件的位移延性系数如表 4 所示。

分析表中数据可得:

- 1) 两试件的延性比均在 3~8 之间, 根据抗震设计规范的要求, 两试件均有较好的延性性能和塑性变形能力;

Table 4. Displacement ductility coefficient of specimens
表 4. 各试件位移延性比

| 试件编号 | 配筋率 | 正向屈服位移/mm | 正向极限位移/mm | 延性比 | 反向屈服位移/mm | 反向极限位移/mm | 延性比 | 平均延性比 |
|---------|-------|-----------|-----------|------|-----------|-----------|------|-------|
| RCBC-SR | 2.21% | 14.53 | 55 | 3.79 | -13.88 | -55 | 3.96 | 3.88 |
| RCBC-SS | 1.58% | 8.33 | 50 | 6.00 | -9.02 | -50 | 5.54 | 5.77 |

2) 当试件的配筋率从 1.58%增大到 2.21%时, 试件的延性比从 5.57 降低到了 3.88, 说明在此范围内配筋率的增大会降低试件延性;

3) 相比与试件 SS, SR 的屈服位移增长了 74%, 极限位移只增长了 10%, 配筋率的增大使 SR 获得了较大的屈服位移, 而在此配筋率范围, 混凝土的强度和变形能力限制了 SR 极限位移的增长, 所以导致 SR 延性比明显减小。

3.2.4. 承载力分析

将各试件的荷载与对应的位移列入下表 5 所示。

Table 5. Displacement and bearing capacity of specimens
表 5. 各试件特征位移及承载力汇总表

| 试件编号 | 正向屈服荷载/KN | 正向屈服位移/mm | 正向最大荷载/KN | 正向最大荷载位移/mm | 正向极限荷载/KN | 正向极限位移/mm |
|---------|-----------|-----------|-----------|-------------|-----------|-----------|
| RCBC-SR | 140 | 14.5 | 306 | 45 | 209.8 | 55 |
| RCBC-SS | 120 | 8.33 | 244 | 40 | 217.2 | 50 |

分析表 5 的数据, 可得:

1) 试件配筋率从 1.58%增加到 2.21%使得构件最大承载力从 244KN 增加到了 306KN, 增长了 25.4%, 说明配筋率的增大对试件最大承载力的提高效果明显;

2) 配筋率的增大使得混凝土受压区高度增加, 有更多的混凝土参与到受压承载中, 所以配筋率增大明显增加了试件的最大承载力, 而相同强度的混凝土(C40)则决定了在此配筋率范围内, 两者相近的破坏荷载。

3.2.5. 刚度退化

本文采用割线刚度代替试件的实际刚度, 割线刚度的计算分三个阶段: 开始加载到屈服为第一阶段、屈服到最大承载力为第二阶段以及最大承载力到破坏为第三阶段, 分别用 K_1 、 K_2 和 K_3 表示这三个阶段的割线刚度。用 α_1 和 α_2 分别表示试件的刚度折减系数, 其中 $\alpha_1 = K_2/K_1$ 和 $\alpha_2 = K_3/K_1$ 。

各试件割线刚度及折减率如下表 6 所示。

Table 6. Stiffness change of specimens
表 6. 各试件刚度变化一览表

| 试件编号 | K_1 | K_2 | K_3 | α_1 | α_2 |
|---------|-------|-------|-------|------------|------------|
| RCBC-SR | 9.64 | 5.45 | -9.62 | 0.57 | -1.00 |
| RCBC-SS | 14.41 | 3.92 | -2.68 | 0.27 | -0.19 |

从表中可以看出:

1) SR 的屈服后刚度 K_2 高于 SS, 说明增大配筋率可以在试件屈服后获得较大的结构抗力;

2) 相比于 SS, SR 的配筋率从增加到了 2.21%, α_1 从 0.27 增加到了 0.57, 说明配筋率的增大可以减缓刚度的退化;

3) SR 的 α_2 绝对值远大于 SS, 表明破坏时 SR 的承载力降低的幅度更大。

3.2.6. 耗能能力

结构或构件在一次周期性荷载中所消耗的能量可以通过计算滞回环所围成的面积求得, 下表 7 列出了试件在加载过程中各阶段的耗能和总耗能。

Table 7. Dissipation of specimens

表 7. 各试件各阶段耗能如下表

| 试件编号 | 耗能(KN*mm) | 屈服 | 最大荷载 | 极限荷载 | 总耗能 |
|---------|-----------|---------|---------|---------|-----------|
| RCBC-SR | | 2452.83 | 4131.56 | 7496.59 | 28,556.59 |
| RCBC-SS | | 1242.52 | 4040.42 | 5168.72 | 19,237.66 |

因各试件的位移和承载力不同, 为了消除其影响, 使得各试件的耗能能力具有可比性, 在此引入结构动力学中比阻尼容量的概念[10], 其定义如下所示:

$$he = E_{SO}/E_D$$

式中, E_{SO} 为试件一个循环中吸收的能量, E_D 为试件在同一个循环中达到最大位移时的势能。

计算各试件在刚达到屈服、达到最大承载力以及达到极限承载力时对应的比阻尼容量值并列于下表 8。

Table 8. Specific damping capacity of specimens

表 8. 各试件比阻尼容量一览表

| 试件编号 | 试件状态 | 屈服 | 最大荷载 | 极限荷载 |
|---------|------|------|------|------|
| RCBC-SR | | 0.28 | 0.30 | 0.52 |
| RCBC-SS | | 0.30 | 0.41 | 0.48 |

从表中可以看出:

- 1) 表 7 表明将配筋率从 1.58% 增加到 2.21% 总耗能增加了 48.4%, 明显提升了试件的总耗能;
- 2) 由表 8 可知, 在使试件第一次达到屈服的那一级循环荷载作用下, RCBC-SS 的比阻尼容量略高于 RCBC-SR, 此时两者的耗能效率相差不大, 这主要是因为此时钢筋基本未屈服, 主要是依靠混凝土在耗能;
- 3) 结合表 7 和表 8 可以看出, 当试件达到最大承载力时, RCBC-SS 和 RCBC-SR 的耗能相近, 但 SS 的耗能效率比 SR 高, 说明 SS 可以以较小的变形和承载力获得和 SR 相近的耗能;
- 4) 当试件达到极限荷载时, SR 的耗能相比 SS 增长了 45%, 而比阻尼容量只增长了 8%, 说明配筋率增加可以明显改善试件的耗能, 但对试件的耗能效率影响不大。

4. 结论

- 1) 当试件配筋率从 1.58% 增加到 2.21% 时, 试件的耗能明显增加;
- 2) 当配筋率在 1.58%~2.21%, 配筋率的增大使得混凝土受压区的高度增大, 从而增大了试件的承载

力;

3) 配筋率在 1.58%~2.21%范围内时, 试件的延性会因为配筋率的增大而降低, 虽然试件在屈服后会因为配筋率的增大而获得更高的结构抗力, 但试件在破坏时会因为配筋率的增大而产生脆性破坏的趋势。

参考文献

- [1] 赵牡珍. 薄壁箱形桥墩与桥塔设计的建议[J]. 国外桥梁, 1996(2): 26-29.
- [2] 方志, 王飞, 殷新锋, 王诚. 钢筋混凝土箱型柱抗震性能的试验研究[J]. 工业建筑, 2012, 42(3): 12-19.
- [3] 孙治国, 王东升, 李宏男, 杜修力. 钢筋混凝土空心桥墩应用及抗震性能研究综述[J]. 交通运输工程学报, 2013, 13(3): 22-32.
- [4] 奉策红. 钢筋混凝土箱型柱抗震性能的试验研究与分析[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2010.
- [5] 赵彦, 谢长旺, 姜虹羽, 等. 矩形空心钢筋混凝土桥墩抗震性能试验研究综述[J]. 防灾科技学院学报, 2010, 12(2): 17-20.
- [6] 杜修力, 陈明琦, 韩强. 钢筋混凝土空心桥墩抗震性能试验研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(11): 254-259.
- [7] 申彦利, 赵雪. 钢筋混凝土空心桥墩抗震性能分析[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2014, 39(1): 48-53.
- [8] 李文广, 刘凡. 基于配筋变化下的混凝土箱型柱抗震性能有限元分析研究[J]. 江苏建筑, 2017(3): 21-24.
- [9] 中华人民共和国交通运输部. JTG/T B02-01—2008. 公路桥梁抗震设计细则[S].
- [10] Chopra, A.K. (2011) Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering. Prentice Hall, Upper Saddle River.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3458, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: hjce@hanspub.org