

Experimental Study on the Seismic Performance of Concrete Box Column Based on the Change of Wall Thickness Ratio

Yiqin Li, Fan Liu

School of Civil Engineering, SUST, Suzhou Jiangsu
Email: jpsn@foxmail.com

Received: May 2nd, 2019; accepted: May 17th, 2019; published: May 24th, 2019

Abstract

Reinforced concrete box column is widely used because of its closed section and good spatial mechanical performance. To explore section wall thickness ratio on seismic performance of box column, this paper designed the four-reinforced concrete box column under low reversed cyclic loading test specimens and drew the conclusion: with the increase of thickness ratio, the bearing capacity of box column was improved besides the ascension of the seismic energy dissipation capacity effectively, but along with the initial stiffness of ascension, the ductility was slightly lower; The effect of flange wall thickness ratio on seismic performance is greater than that of web wall thickness ratio.

Keywords

Reinforced Concrete Box Column, Wall Thickness Ratio, The Seismic Energy Dissipation

基于壁厚比变化下的混凝土箱型柱抗震性能的试验研究

李以勤, 刘 凡

苏州科技大学土木工程学院, 江苏 苏州
Email: jpsn@foxmail.com

收稿日期: 2019年5月2日; 录用日期: 2019年5月17日; 发布日期: 2019年5月24日

摘 要

钢筋混凝土箱型柱由于其闭合截面的特性, 使其具有良好的空间受力性能, 因而被广泛采用。为了探究

截面壁厚比变化对箱型柱抗震性能的影响, 本文设计了四个钢筋混凝土箱型柱试件进行低周反复加载试验, 通过对试验数据分析和理论分析得出结论: 随着壁厚比的增加, 箱型柱的承载力得到提高, 抗震耗能能力得到有效的提升, 但随着初始刚度的提升, 其延性略有降低; 翼缘壁厚比对抗震性能的影响大于腹板壁厚比。

关键词

箱型柱, 壁厚比, 抗震耗能

Copyright © 2019 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

传统的钢筋混凝土实心柱因其自身重力大的缺点已经不能较好的满足现代建筑体系中高抗震性能的要求。而箱型柱这类结构构件具有自重小, 空间抗扭能力强, 抗震性能好等优点, 不仅满足了结构中受力要求, 还节约了用料, 具有较好的经济效益, 因而被广泛采用。然而对于此类构件的截面尺寸设计并没有详细的参考规范, 相应的国内外研究主要集中在配筋率、长细比、轴压比、破坏形态等方面, 而在尺寸变化下的壁厚比对抗震性能研究还不够深入, 也没有相对全面的试验研究。因此本文设计了四个钢筋混凝土箱型柱试件, 通过拟静力试验得到相关数据并进行数值统计分析和理论分析, 研究其截面壁厚比改变对箱型柱抗震性能的影响。

2. 壁厚比的确定

壁厚比是体现箱型柱截面与实心柱截面差别的一项重要特征, 本文将以箱型截面两个方向的壁厚比对该类试件进行抗震性能分析。规定短边为加载方向, 把反映腹板方向的肋板相对其外轮廓尺寸的关系叫做腹板壁厚比, 把反映翼缘方向的肋板相对其外轮廓尺寸的关系称做翼缘壁厚比。通过研究这两个试验控制变量的变化, 从而对钢筋混凝土箱型柱的抗震性能进行定量分析图 1。

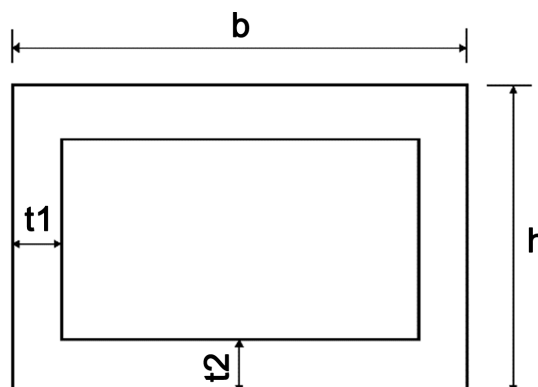


Figure 1. Section diagram of box column

图 1. 箱型柱的截面示意图

腹板壁厚比:

$$C_1 = \frac{2t_1}{b} \quad (1)$$

翼缘壁厚比:

$$C_2 = \frac{2t_2}{b} \quad (2)$$

壁厚比是一个影响箱型柱抗震性能的重要因素,故而本文试件设计中应选取合适的壁厚比。季杨丹、陈奕玮[1]提出壁厚对空心柱的受力性能影响很大,随着壁宽比的减小,空心柱的剪力滞与轴压比逐渐增大,刚度整体呈下降趋势,当壁厚比大于等于 0.2 时,构件受力性能较好。所以本试验在设计壁厚比时应大于 0.2,在试验的变参控制中为了突显出壁厚的影响并符合受力性能良好的要求,分别将试验构件腹板和翼缘壁厚比变化到 0.5 和 0.31。本试验中四个试件的壁厚比的取值如表 1 所示。

Table 1. Selection of wall thickness ratio of specimen

表 1. 试件壁厚比的选取

试件编号	腹板壁厚比	翼缘壁厚比
BC-1	0.22	0.35
BC-2	0.31	0.35
BC-3	0.22	0.5
BC-4	0.31	0.5

3. 试验概况

3.1. 试件设计

本文试件 BC-1 标准柱的设计参考了实际工程中的钢筋混凝土箱型柱,与实际工程中柱尺寸比为 1:10,其余试件腹板壁厚、翼缘壁厚、壁厚较标准柱依次单一变化,编号分别为 BC-2、BC-3 和 BC-4。各试件的具体尺寸参数如表 2、图 2 所示。

Table 2. Basic parameters of the specimen

表 2. 试件基本参数

试件	尺寸/mm	受拉处纵筋			受压处纵筋			架立筋			
	$b \times h \times t_1 \times t_2$	长度/mm	悬臂长度/mm	直径/mm	根数	直径/mm	长度/mm	根数	直径/mm	长度/mm	根数
BC-1	650 × 400 × 70 × 70	2150	1600	8	14	8	2150	14	8	2150	12
BC-2	650 × 400 × 100 × 70	2150	1600	8	14	8	2150	14	8	2150	12
BC-3	650 × 400 × 70 × 100	2150	1600	8	14	8	2150	14	8	2150	12
BC-4	650 × 400 × 100 × 100	2150	1600	8	14	8	2150	14	8	2150	12

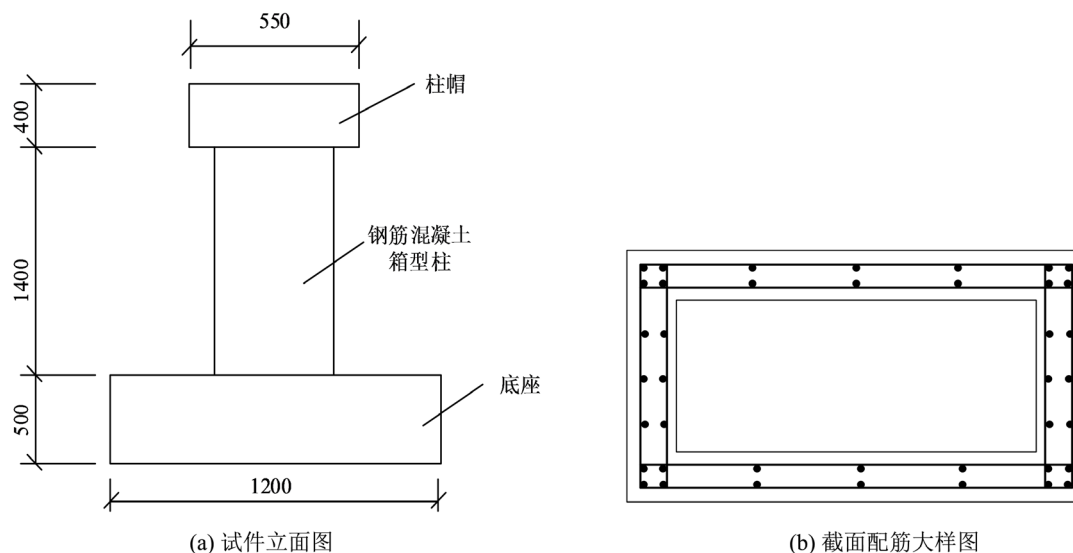
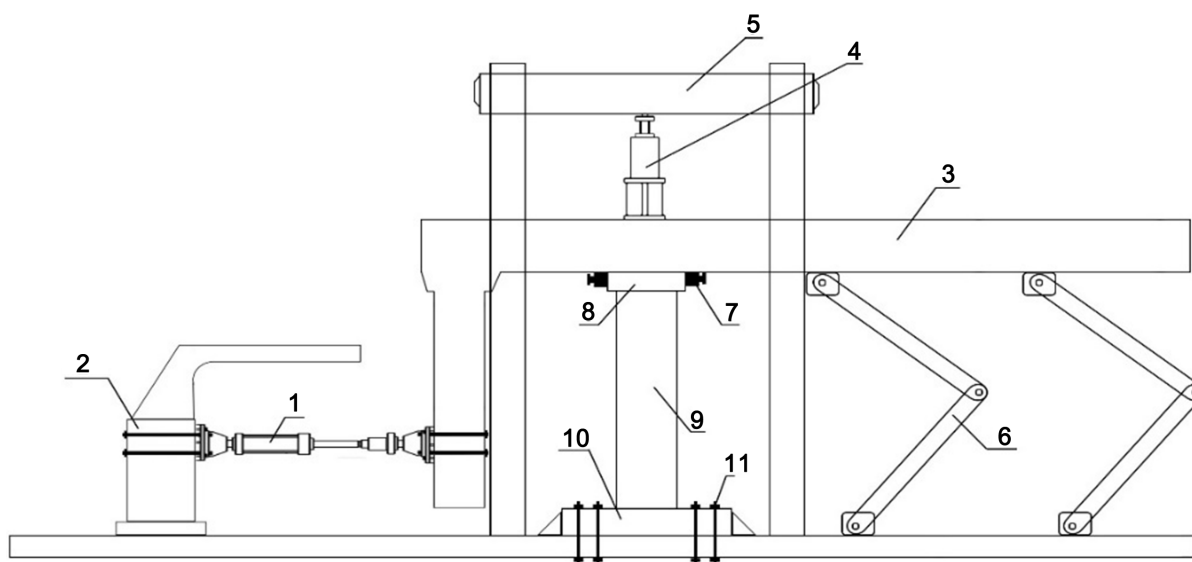


Figure 2. Specimen elevation drawing and section reinforcement drawing
图 2. 试件立面图及截面配筋大样图

3.2. 试验测量方法

试验加载装置由水平与竖直方向的加载装置、数据采集系统构成的。试验过程加载时, 对竖向的轴压进行固定并通过千斤顶的工作来提供墩顶的水平位移量。动作器一段固定反力墙, 另一端耦合往复梁, 梁的另一端通过四连杆连接地面。水平荷载的加载方向是平行于截面短边方向的。加载设备如图 3 所示。



1.水平作用器, 2.反力墙, 3.加载横梁, 4.液压千斤顶, 5.龙门架, 6.连杆, 7.柱顶锁紧锚, 8.柱帽, 9.柱体, 10.柱底, 11.地锚

Figure 3. Test equipment and specimen layout
图 3. 试验装置及试件布置

试验的加载方向分为两个方向, 其一是竖直方向的加载, 该方向的力为 0.1 轴压比, 在加载之前要对进行预载; 其二是水平方向的加载, 加载制度是采用力-位移混合控制方式[2] [3]。首先以 20 kN 的荷载增幅对水平荷载进行逐级加载, 当混凝土出现第一级裂缝时开裂后, 以 10 kN 的荷载增幅对水平荷载

进行逐级加载, 并持载时间控制在 20 s 并且循环周期为 3, 在构件内的构件达到屈服后, 水平荷载按照屈服时发生的 0.2 倍位移量的增幅, 进行 3 次循环周期, 直至试件的破坏时的承载力下降至峰值荷载的 15%时, 默认破坏。每一级的详细加载过程见如图 4。

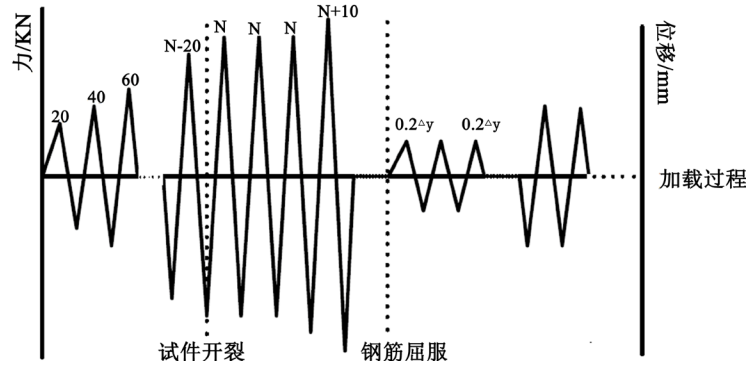


Figure 4. Schematic diagram of loading system
图 4. 加载制度示意图

3.3. 测量内容

- 1) 得到各级循环加载下关于水平力与水平位移之间的关系, 即滞回曲线[4] [5]。
- 2) 在加载过程中柱内的纵筋应变值大小, 以获得构件的屈服点[6]。
- 3) 量测钢筋混凝土箱型柱在加载过程中裂缝出现的位置、长度、角度以及宽度, 记录试件的破坏过程[7] [8]。

4. 试验结果与分析

4.1. 滞回曲线

为了细致地探究壁厚比变化对试件滞回曲线的影响规律, 在分析滞回曲线时采用了定量分析法, 所以需要计算出滞回环的面积, 滞回环面积的求法采用的是积分法[9], 积分公式如下:

$$\sum_{n=1}^n S_n = \sum_{n=1}^n \frac{(\Delta_n - \Delta_{n-1}) \times (P_n + P_{n-1})}{2} \quad (3)$$

式中, n 表示积分点的个数。个数越多, 结果越精确。 $\sum_{n=1}^n S_n$ 一表示箱型柱试件滞回环的总面积。 Δ_n, Δ_{n-1} 表示滞回曲线中两个连续地位移点。 P_n, P_{n-1} 一表示滞回曲线中两个连续地位移点分别对应的荷载值。计算得各试件的滞回环面积如表 3 所示。

Table 3. Wall thickness ratio and area of hysteresis loop

表 3. 试件的壁厚比与滞回环面积

试件	翼缘壁厚比	腹板壁厚比	滞回环总面积
BC-1	0.35	0.22	19,241.52
BC-2	0.35	0.31	23,241.69
BC-3	0.5	0.22	34,643.28
BC-4	0.5	0.31	41,228.95

对比各试件的滞回曲线和滞回环面积(图 5), 分析如下:

1) 试件 BC-1 与 BC-3、BC-2 与 BC-4 随着翼缘厚度的增大, 翼缘壁厚比加大, 其截面翼缘壁厚比由 0.35 到 0.5 增长了 43%, 滞回环面积有大幅度的增长, 增长幅度分别为 80%、77%, 说明提高箱型柱翼缘壁厚比能够有效的提升构件的抗震耗能性能。

2) 通过比较试件 BC-1 与 BC-2、BC-3 与 BC-4 随着腹板厚度的增大, 腹板壁厚比加大, 其截面腹板壁厚比由 0.22 到 0.31 增长了 41%, 滞回环面积稍有增长, 增长幅度为 21%、19%, 说明提高箱型柱腹板壁厚比对构件抗震耗能影响远没有提高翼缘壁厚比大。

3) 比较试件 BC-1 与 BC-4, 其截面翼缘壁厚比由 0.35 到 0.5 增长了 43%, 腹板壁厚比由 0.22 到 0.31 增长了 41%, 滞回环的面积得到了极大的增长, 涨幅为 114%, 说明分别提高其两个方向的壁厚比对柱的抗震耗能性能有着很显著的促进。

通过上述定量分析, 可以得出增大翼缘壁厚比比增大腹板壁厚比能更为有效地提升构件地抗震耗能性能。同级别增大构件的壁厚比腹板对构件抗震耗能性能的影响幅度大概只有翼缘的四分之一。主要原因是翼缘壁厚比的变化对截面惯性矩的影响大于腹板壁厚比的变化。

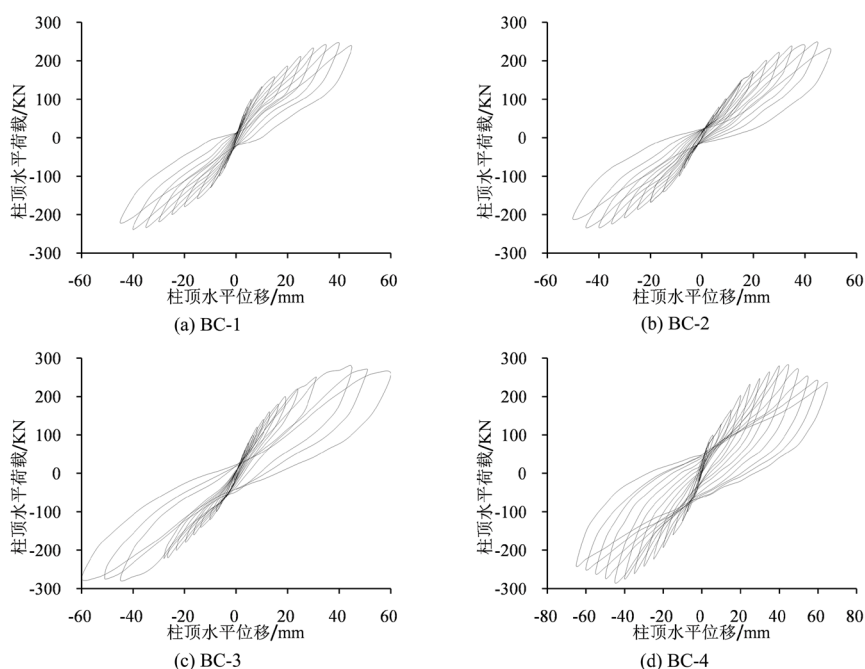


Figure 5. Hysteresis curves of each specimen
图 5. 各试件的滞回曲线

4.2. 骨架曲线

分别对比图 6 中的图 6(a)、图 6(b)、图 6(c)和图 6(d), 分析如下:

1) 以试件 BC-1 为参考柱, BC-3 的翼缘壁厚比由 0.35 到 0.5 提高了 43%, 其屈服点位移随之增大了 15.7%, 最大荷载、最大位移也分别增大了 13%、12.5%, 极限位移增长了 6.6%。从骨架曲线的第一阶段来看, 两者的刚度变化规律几乎一致; 而到了第二阶段, BC-3 的割线刚度表现出了大幅度的提升, 当达到屈服状态时, 试件 BC-3 的承载力大于试件 BC-1; 在第三阶段中, 试件 BC-3 的割线刚度大于 BC-1, 当荷载增大到峰值点时, 其水平承载力远高于 BC-1, 在极限状态时, 割线刚度变化趋势几乎重合, 但是 BC-3 的刚度退化现象比 BC-1 更为延缓。总体而言, 增大翼缘壁厚比对箱型柱的水平承载力与刚度有明显的提高。

2) 以试件 BC-2 作为参照, BC-4 的翼缘壁厚比由 0.35 到 0.5 提高了 43%, 其屈服点位移随之增大了 14.6%, 最大荷载、最大位移也分别增大了 16.9%、5.9%, 极限位移增长了 5%。不难发现, (1)和(2)中的试验控制变量都为翼缘壁厚比, 并且两者骨架曲线的变化趋势也较为相近, 这也同时验证了上述结论(1)。

3) 以试件 BC-1 为参考柱, BC-2 的腹板壁厚比由 0.22 到 0.31 提高了 41%, 其屈服点荷载与位移随之增加了 16.7%、2.2%, 最大荷载、最大位移和屈服位移基本没有变化。从骨架曲线的第一阶段来看, 两者的刚度变化规律几乎一致; 而到了第二、三阶段, BC-2 的刚度稍稍小于 BC-1, 割线刚度变化趋势几乎重合, 其承载力与刚度没有明显的变化。总而言之, 增大腹板壁厚比对箱型柱的水平承载力与刚度无明显的提高。

4) 以试件 BC-3 为参照, BC-4 的腹板壁厚比由 0.22 到 0.31 提高了 41%, 而其屈服点的荷载、位移随之增大了 7%、1.6%, 最大荷载、最大位移和屈服位移基本没有变化。说明增大翼缘壁厚比对箱型柱的水平承载力与刚度无明显的提高。

通过上述比较得出, 增加构件的壁厚比能够有效地提高结构水平承载力和刚度。在同等条件下, 改变翼缘壁厚比所能提高的水平承载力大于改变腹板壁厚比提高的水平承载力, 且提高翼缘壁厚比会较大地增加构件刚度。

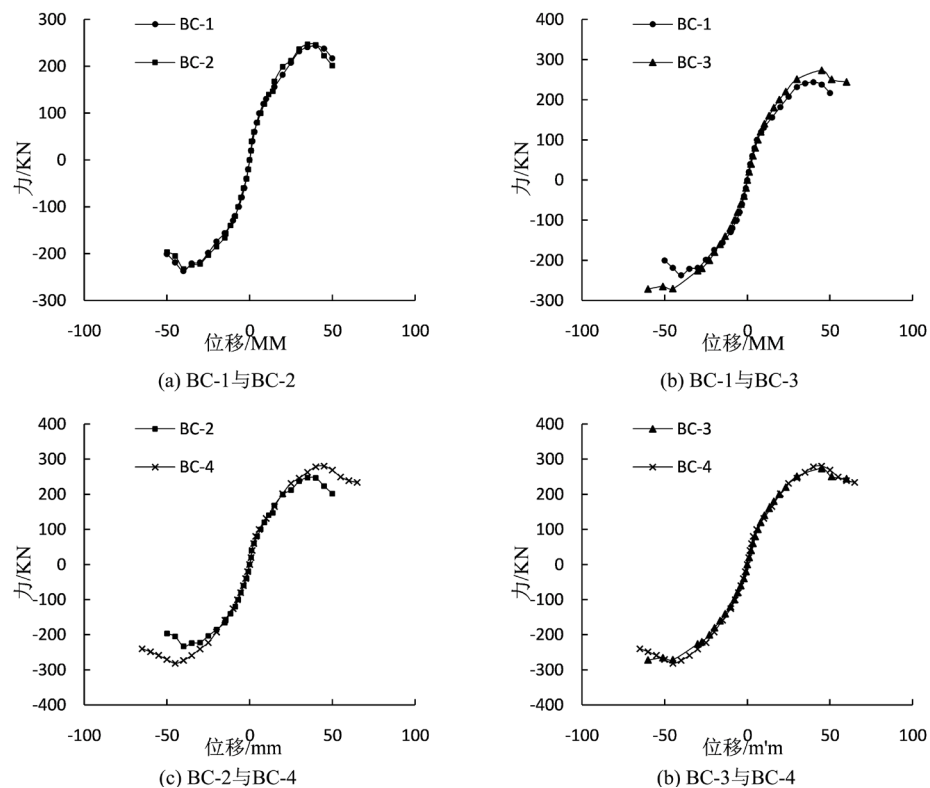


Figure 6. Skeleton curves of each specimen

图 6. 各试件的骨架曲线

4.3. 延性分析

延性代表结构的塑性变形能力, 结构的塑性变形能力越好抗震性能越优越。延性一般用位移延性系数 μ [10]来表示:

$$\mu = \frac{\Delta_{\mu}}{\Delta_y} \quad (4)$$

式中, Δ_{μ} 为试件的极限位移, Δ_y 为试件的屈服位移。根据公式 4 可以计算得到各试件的位移延性系数, 如表 4 所示。

Table 4. The characteristic displacement value and ductility coefficient of the specimen
表 4. 试件特征位移值与位移延性系数

试件编号	特征点	BC-1	BC-2	BC-3	BC-4
正向加载	$\Delta y/mm$	8.33	8.88	10	10.08
	$\Delta u/mm$	52.5	52.1	54.44	55.4
反向加载	$\Delta y/mm$	-9.02	-8.85	-10.08	-10.24
	$\Delta u/mm$	-50.9	-52.4	-55.74	-54.32
平均位移延性系数		5.96	5.89	5.49	5.40

观察表 4, 作以下分析:

1) 对比两组试件 BC-1 与 BC-2、BC-3 与 BC-4 发现延性系数分别减小了 1.2%和 2.02%。说明腹板壁厚比的变化与其延性性能与变形能力呈负相关, 但是这种影响较小。

2) 对比两组试件 BC-1 与 BC-3、BC-2 与 BC-4 发现延性系数分别减小了约为 8%和 9%, 说明增大试验构件的翼缘壁厚比较大程度降低了结构的延性性能与变形能力。

3) 对比试件 BC-1 与 BC-4 发现对两个方向(沿腹板、翼缘板)的壁厚比增大, 其位移延性系数将会下降 10%左右, 说明对两个方向(沿腹板、翼缘板)的壁厚比增大很大程度上降低构件的延性性能与变形能力。

通过以上对延性系数的分析, 可发现构件的壁厚比和延性系数成负增长关系, 且提高翼缘壁厚比所导致的构件延性下降大于腹板壁厚比。这主要是因为翼缘壁厚比的增加较大地提升了结构的初始刚度。

5. 结论

本文利用四个不同壁厚比的试件, 分别从耗能能力、承载力和延性三个方面分析了壁厚比对钢筋混凝土箱型柱的抗震性能影响, 分析结果如下:

1) 壁厚比的增加能够提高箱型柱的抗震耗能能力, 提高翼缘壁厚比对构件抗震耗能的影响远大于提高腹板壁厚比。

2) 随着翼缘壁厚比的增加, 箱型柱的水平承载力有较大增长, 且刚度也有所提升。腹板壁厚比对箱型柱承载能力的影响作用远小于翼缘壁厚比。

3) 虽增加翼缘壁厚比能够提高耗能能力和承载力, 但也需控制在一个合理的范围内, 因为增加翼缘壁厚比会较大程度降低结构的延性性能。

参考文献

- [1] 季杨丹, 陈奕玮, 杜东升, 李威威. 空心柱壁宽比力学性能影响的研究[J]. 建筑科学, 2016, 32(3): 94-99.
- [2] 王墩, 赵海琼, 吕西林. 建筑结构拟静力试验方法的加载制度[J]. 四川建筑科学研究, 2014, 40(3): 54-59.
- [3] Leon, R.T. (1996) Considerations for Use of Quasi-Static Testing. *Earthquake Spectra*, **12**, 87-109. <https://doi.org/10.1193/1.1585869>
- [4] Taylor, A.W., Rowell, R.B. and Breen, J.E. (1995) Behavior of Thin-Walled Concrete Box Piers. *ACI Structural*

Journal, **92**, 319-333. <https://doi.org/10.14359/1133>

- [5] 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.
- [6] 杜修力, 陈明琦, 韩强. 钢筋混凝土空心桥墩抗震性能是研究[J]. 震动与冲击, 2011, 30(11): 254-259.
- [7] 丁红艳. 钢筋混凝土箱型截面压弯构件破坏形态试验研究[D]: [硕士学位论文]. 苏州: 苏州科技大学, 2016.
- [8] 金志鹏. 钢筋混凝土箱型柱在拟静力荷载作用下的破坏形态的试验研究[D]: [硕士学位论文]. 苏州: 苏州科技大学.
- [9] 周明, 张素梅. 方钢管混凝土压弯构件荷载-位移滞回性能研究[C]//中国钢结构协会. 中国钢协钢-混凝土组合结构协会第八次年会论文集: 2001 年卷. 哈尔滨, 2001.
- [10] 王庆华, 张敏, 王晓东. 钢筋混凝土压弯构件荷载-挠度全过程分析[J]. 华东交通大学学报, 2007, 24(5): 17-20.

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