

不锈钢-碳素钢筋混合配筋混凝土空心墩柱 抗震性能研究

徐春一¹, 李佳莹¹, 牛 奔², 佟 舟³

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 中国建筑第六工程局有限公司天津轨道交通分公司, 天津 300000; 3. 沈阳城市建设学院土木工程系, 辽宁 沈阳 110167)

摘 要 目的 研究混合配筋情况下不锈钢筋与碳素钢筋在混凝土空心墩柱中的协同工作性能。方法 利用 Abaqus 有限元软件建立钢筋混凝土空心墩柱模型, 并以已有试验结果验证了模型的适用性。基于所建模型, 对不锈钢筋与碳素钢筋混合配筋、全碳素钢筋两种配筋形式下混凝土空心墩柱的抗震性能进行研究。然后扩大试件模型的参数, 对不锈钢-碳素钢筋混凝土空心墩柱的抗震性能展开进一步分析。结果 各墩柱的破坏均最先发生在柱最底端; 两种配筋形式下试件的滞回曲线相似; 各试件的刚度相差不大, 但混合配筋试件的承载能力和耗能能力更好。由此验证了不锈钢筋-碳素钢筋混合配筋混凝土空心墩柱有良好的综合抗震性能。结论 当控制高宽比在 4~10、轴压比在 0.5~0.7 以及纵筋配筋率在 1.5%~4.3% 时, 适当减小高宽比可以提升混合配筋试件的承载力, 且降低轴压比、增加纵筋配筋率可提高混合配筋试件的延性。

关键词 不锈钢筋; 混合配筋; 不锈钢筋本构模型; 有限元模拟; 抗震性能

中图分类号 TU375

文献标志码 A

Study on Seismic Performance of Concrete Hollow Pier Column with Mixed Stainless Steel-Carbon Steel Reinforcement

XU Chunyi¹, LI Jiaying¹, NIU Ben², TONG Zhou³

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. China Construction Sixth Engineering Bureau Limited Tianjin Rail Transit Branch, Tianjin, China, 300000; 3. Department of Civil Engineering, Shenyang Urban Construction, Shenyang, China, 110167)

Abstract: To study the cooperation work performance of stainless steel bar and carbon steel bar in

收稿日期: 2021-03-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(51808353); 辽宁省教育厅服务地方项目(Infw201905); 沈阳建筑大学科研创新培育计划项目(CXPY2017022)

作者简介: 徐春一(1983—), 女, 副教授, 博士, 主要从事新型混凝土结构等方面研究。

concrete hollow pier columns under mixed reinforcement. The reinforced concrete hollow pier column model was established with using Abaqus finite element software, and the applicability of the analytical model was verified with test results from the literature. Based on the proposed model, the seismic performance of concrete hollow pier columns with two types of reinforcement, mixed reinforcement of stainless steel bars and carbon steel bars and all carbon steel bars were analyzed. After wards, the seismic performance of the stainless steel-carbon steel reinforced concrete hollow pier column was further analyzed with expanding the parameters of the specimen model. The damage of each pier column occurred first at the foot of the column; the hysteresis curves of the specimens were similar in both reinforcement forms; the stiffness of each specimen was similar, but the bearing capacity and energy dissipation capacity of the mixed reinforcement specimens were better. This verifies that the mixed reinforced concrete hollow pier column with stainless steel bar-carbon steel bar has good comprehensive seismic performance. When the depth-width ratio was controlled from 4 to 10, the axial compression ratio was controlled from 0.5 to 0.7 and the longitudinal reinforcement rate was controlled from 1.5% to 4.3%, the load bearing capacity of the mixed reinforcement specimens could be improved by appropriately reducing the depth-width ratio, and the ductility of the mixed reinforcement specimens could be improved by reducing the axial compression ratio and increasing the longitudinal reinforcement rate.

Key words: stainless steel bar; mixed reinforcement; stainless steel bar constitutive model; finite-element simulation; seismic performance

钢筋锈蚀已成为工程结构中的重大安全隐患,从根本上解决混凝土结构中钢筋锈蚀的方法值得关注。因不锈钢筋与碳素钢筋的力学性能相近,故用不锈钢筋代替碳素钢筋可有效解决目前钢筋锈蚀的问题。但不锈钢筋造价相对较高,利用不锈钢筋与碳素钢筋混合配筋的方式可满足经济需求,因此对混合配筋的混凝土结构进行研究,特别是对地震作用下的行为研究是十分必要的。

近年来,针对不锈钢筋的研究大多集中在其自身耐腐蚀性能及混凝土构件的力学性能等方面,对不锈钢筋混凝土构件抗震性能的探究较少,阻碍了不锈钢筋混凝土结构的推广应用。现有研究表明不锈钢筋防锈蚀能力强、延性高^[1-5],较普通钢筋构件而言,不锈钢构件的耗能能力更好且承载力较高^[6-8]。国内外已有研究证明了混合配筋的可行性^[9-12],可见混合配筋形式在建筑结构中具有较好的应用前景,为不锈钢筋和碳素钢筋混合配筋混凝土结构的抗震性能研究奠定了基础。由于国内对混合配筋混凝土结构的抗震性能研究较少,因此笔者采用混合配

筋方式对混凝土空心墩柱的受力性能进行模拟,对比全碳素钢筋、不锈钢-碳素钢筋混合配筋混凝土空心墩柱的抗震性能。并通过扩大试件参数对混合配筋混凝土空心墩柱的抗震性能展开进一步分析。

1 奥氏体不锈钢 S30408 的本构关系试验

1.1 奥氏体不锈钢筋 S30408 室温单向拉伸试验

试验选用钢筋有 3 种,具体试件参数见表 1。

表 1 拉伸试验试件设计

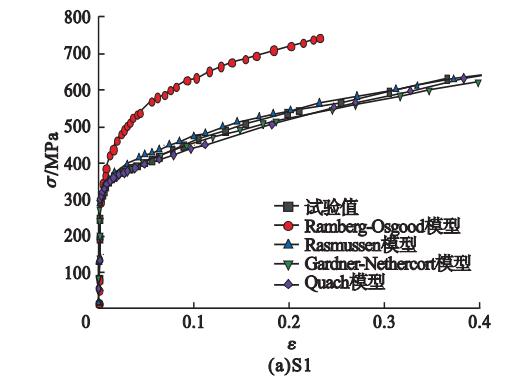
Table 1 The test piece design for tensile testing			
钢筋编号	直径/mm	钢筋类型	根数
S1 ~ S3	5.5	光圆	3
S4 ~ S9	16	带肋	6
S10 ~ S12	20	带肋	3

试验室温度设在 $(23 \pm 0.5)^\circ\text{C}$,拉伸试验的荷载通过施加力和引伸计一同控制。当塑性应变小于等于 0.2% 时采用应变片读数,塑性应变大于 0.2% 时采用位移计读数。

试验过程中,“颈缩”现象明显。试件破坏方向和拉伸方向大致成 45°。3 种直径的不锈钢筋应力-应变曲线大体相似,由应力-应变曲线可以得出,不同直径的不锈钢筋从开始加载到试验结束均分为弹性阶段、强化阶段、劲缩阶段等^[13-14]。

1.2 奥氏体不锈钢筋 S30408 本构关系模型的确定

通过拉伸试验分析可得,奥氏体不锈钢筋 S30408 应力-应变曲线呈非线性变化,没有明显屈服。选取 3 种不同直径的不锈钢筋试件,对已有的 Ramberg-Osgood 模型、Rasmussen 模型、Gardner-Nethercort 模型、Quach 模型进行对比,不同模型下 S1、S4 和 S10 的应力-应变曲线如图 1 所示。



$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{E_0} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right)^n, & \sigma \leq \sigma_{0.2}; \\ \frac{\sigma - \sigma_{0.2}}{E_{0.2}} + \left(0.008 - (\sigma_{1.0} - \sigma_{0.2}) \left(\frac{1}{E_0} - \frac{1}{E_{0.2}} \right) \right) \left(\frac{\sigma - \sigma_{0.2}}{\sigma_{1.0} - \sigma_{0.2}} \right)^{n'_{0.2,1.0}} + \varepsilon_{0.2}, & \sigma_{0.2} < \sigma \leq \sigma_{2.0}; \\ \frac{\sigma - a}{b + \sigma}, & \sigma > \sigma_{2.0}. \end{cases} \quad (1)$$

式中:

$$\sigma_{2.0} = \frac{1 + (\sigma_{1.0}/\sigma_{2.0} - 1)A^{1/n'_{0.2,1.0}}}{1 + e[E_0/E_{0.2} - 1][\sigma_{1.0}/\sigma_{2.0} - 1]} \frac{A^{1/n'_{0.2,1.0}}}{B} \sigma_{0.2},$$
$$A = \frac{B}{0.008 + e[\sigma_{1.0}/\sigma_{0.2} - 1][1 - E_0/E_{0.2}]},$$
$$B = 0.018 + e\left[\frac{E_0}{E_{0.2}} - 1\right].$$

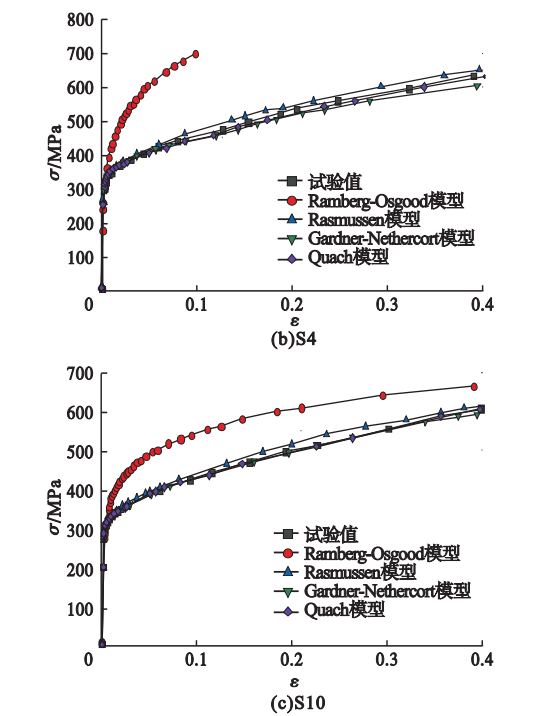


图 1 不同直径的 S30408 应力-应变曲线对比
Fig. 1 Comparison of stress-strain curves of S30408 with different diameters

就整体应力-应变曲线来看,Quach 模型偏差最小,且精度较高,可用做奥氏体不锈钢筋 S30408 的本构模型。因此,将 Quach 模型用于本次模拟研究中。Quach 模型中不锈钢应力-应变公式如下:

2 有限元模型的建立

2.1 试件参数

为对比两种配筋形式下模型的抗震性能,设计两种试件:一个为全碳素钢筋试件(与文献[15]中试验试件设计相同参数);另一个为不锈钢筋-碳素钢筋混合配筋试件。桥墩模型的截面高宽为 0.5 m × 0.36 m,壁厚为 120 mm。试件尺寸与配筋参数见图 2 和表 2。

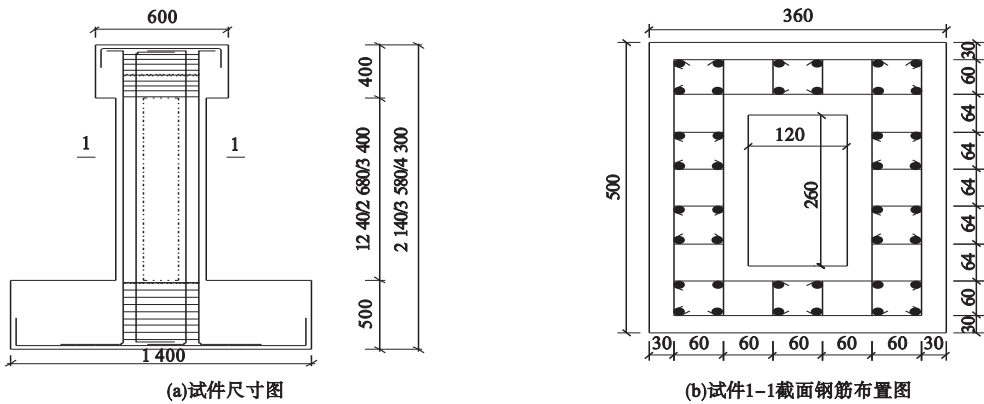


图 2 试件尺寸与配筋

Fig. 2 Size and reinforcement of test piece

表 2 试件参数

试件编号	墩高/mm	高宽比	轴压力/kN	轴压比	纵向钢筋	
					纵筋/mm	配筋率
Z1	1 440	4	280	0. 1	40Φ8	0. 015
Z2	1 440	4	280	0. 1	24Φ _s 8 + 16Φ8	0. 015

2.2 本构关系

模拟采用 C40 混凝土,混凝土采用塑性损伤模型。其单轴应力 - 应变曲线选用《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)中提出的单轴应力 - 应变曲线^[16]。碳素钢筋采用双折线弹塑性模型,不锈钢筋选用 Quach 模型。

2.3 有限元建模

混凝土采用三维实体单元 C3D8R,钢筋选择三维桁架单元 T3D2。以混凝土空心墩柱作为研究对象,建立有限元模型。为研究配筋形式对混凝土空心墩柱抗震性能的影响,建立两个墩柱模型,分别赋予不同钢筋骨架:碳素钢筋试件 Z1;外层为不锈钢筋,内层为碳素钢筋试件 Z2。模型中分别对两种配筋形式下柱顶的侧面施加往复位移,柱顶施加恒定竖向荷载。加载程序见图 3。

2.4 模型验证

采用文献[15]中普通钢筋混凝土空心桥墩抗震性能研究的试验结果验证文中模型的适用性。Z1 的模拟结果和文献[15]中试验对比结果见图 4。可以看出,模拟试件的滞回曲线与试验滞回曲线基本吻合。因此建

立的有限元模型能有效模拟钢筋混凝土矩形空心桥墩抗震性能。

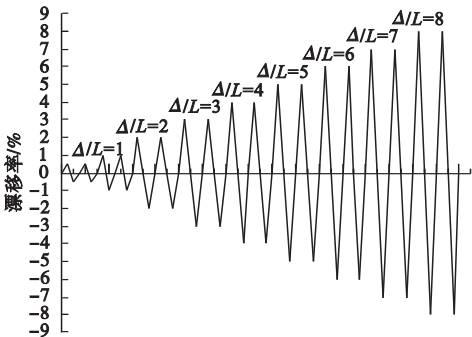


图 3 加载位移时程

Fig. 3 Loading displacement time history

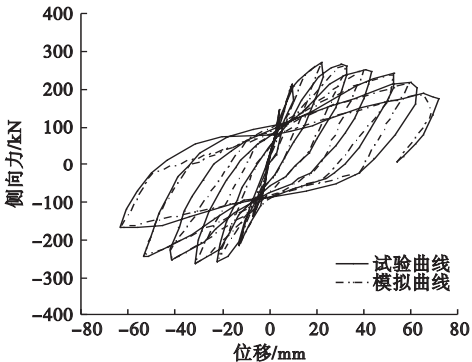


图 4 普通碳素钢筋试件数值模拟与试验结果对比

Fig. 4 Comparison of numerical simulation and test results for common carbon steel specimen

3 不同配筋形式下混凝土空心墩柱抗震性能分析

为分析不锈钢筋与碳素钢筋在混凝土空心墩柱中的协同工作性能,笔者对两种配筋形式的混凝土空心墩柱进行模拟,并对试件的破坏形式、滞回性能、承载力、刚度退化及

耗能特性等抗震性能进行对比分析。

3.1 应力云图

两种模型试件的 Mises 云图如图 5 所示。由图可知,各墩柱的破坏均最先发生在柱最底端,随往复位移次数增加,应力最大部位向柱顶移动。

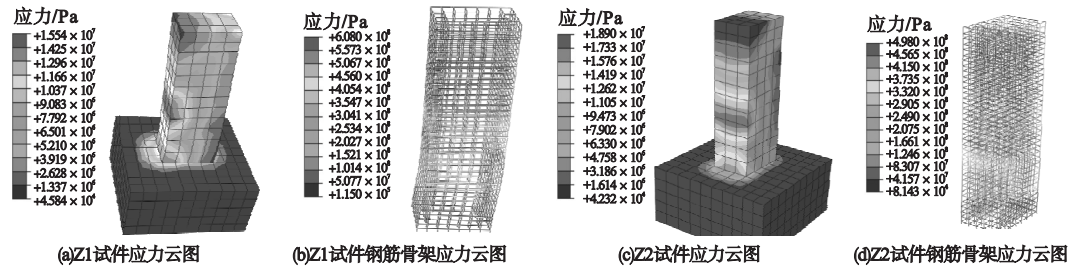


图 5 Z1、Z2 试件及钢筋骨架应力云图

3.2 滞回曲线与骨架曲线

Z1、Z2 的滞回曲线和骨架曲线如图 6、图 7 所示。由图可知,加载初期试件处于弹性阶段,初始刚度变化不大,随着加载层级增大,滞回曲线发生倾斜,且倾斜程度逐渐加

大,说明试件承载能力不断衰减,刚度逐渐降低。Z1 屈服荷载和屈服位移相对较小,但进入屈服阶段后,Z1 的滞回环相比 Z2 饱满,达到破坏强度后,因不锈钢筋弹性模量小、变形大,Z2 的骨架曲线下降,刚度退化较快。

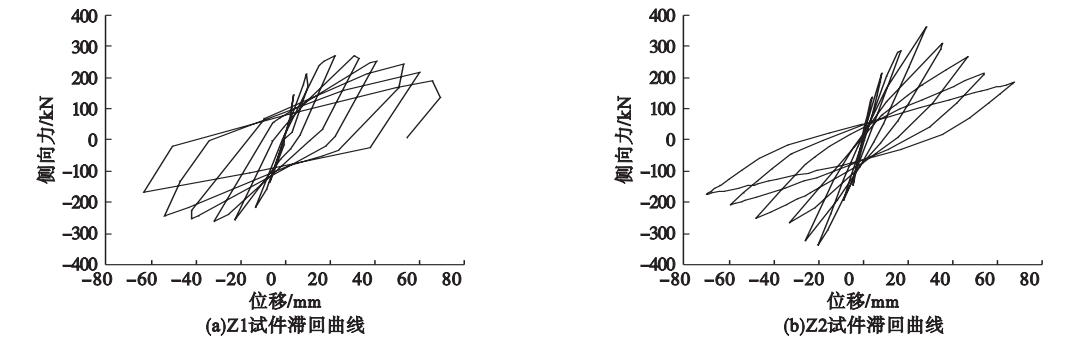


图 6 Z1、Z2 滞回曲线

Fig. 6 Hysteresis loop of Z1 and Z2

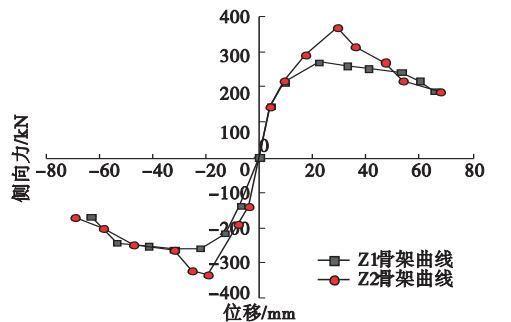


图 7 Z1、Z2 骨架曲线对比

Fig. 7 Skeleton curves comparison of Z1 and Z2

3.3 承载力

通过试件的骨架曲线得到试件 Z1、Z2 的不同阶段荷载结果见表 3。从表中可以看出,Z2 的屈服荷载比 Z1 提高了 49.55%,同时 Z2 的极限荷载较 Z1 增大了 41.47%。说明配置不锈钢筋对于试件的屈服荷载和极限荷载都有提高,且对屈服荷载的影响更显著。

表 3 试件不同阶段的荷载数据

Table 3 Load data of each specimen at different stages

试件编号	屈服荷载/kN	极限荷载/kN	破坏荷载/kN
Z1	144. 671	260. 401	241. 943
Z2	216. 360	368. 392	269. 612

3.4 刚度退化

两种配筋形式下试件的刚度退化曲线如图 8 所示。从图中可以看出,在往复位移加载过程中,试件的刚度随加载位移的增加而逐渐降低。Z2 的初始刚度较大,在加载初期刚度退化较快,随着加载层级增大,试件的残余变形逐渐积累,试件的刚度下降程度越来越平缓,最后两个试件的刚度相差不大。

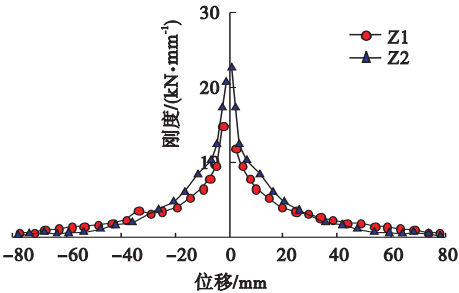


图 8 两种配筋形式下试件刚度退化曲线
Fig. 8 Stiffness degradation curves of components

3.5 耗能能力

为了研究试件的耗能能力,采用等效黏滞阻尼系数 h_e 来表示试件的耗能能力。耗能计算简图见图 9, h_e 表达式如下:

$$h_e = \frac{E}{2\pi}, \tag{2}$$

$$E = \frac{S_{(ABC + ADC)}}{S_{(OBE + ODF)}}. \tag{3}$$

式中: E 为能量耗散系数; h_e 为等效黏滞阻尼系数; $S_{(ABC + ADC)}$ 为图中滞回环面积; $S_{(OBE + ODF)}$ 为图中三角形面积。

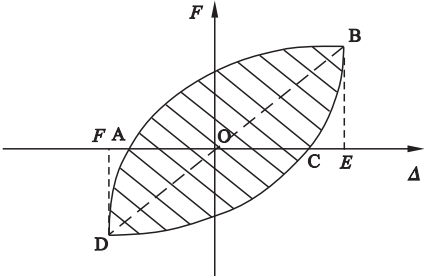


图 9 试件耗能计算简图
Fig. 9 Sketch of specimen energy consumption calculation

各试件在不同加载周期的等效黏滞阻尼系数见表 4,其中第 1~4 周期表示试件屈服前的周期,第 5~8 周期表示试件屈服后的周期。随着加载位移的增加,各试件对应的等效黏滞阻尼系数变化曲线见图 10。

表 4 试件等效黏滞阻尼系数

Table 4 Equivalent viscous damping coefficient of specimens

试件编号	等效黏滞阻尼系数							
	第 1 周期	第 2 周期	第 3 周期	第 4 周期	第 5 周期	第 6 周期	第 7 周期	第 8 周期
Z1	0. 085	0. 095	0. 103	0. 119	0. 134	0. 103	0. 081	0. 080
Z2	0. 072	0. 097	0. 103	0. 148	0. 182	0. 143	0. 133	0. 124

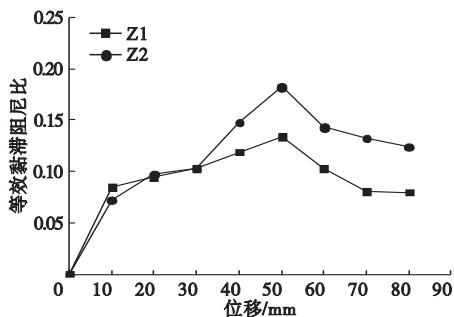


图 10 等效黏滞阻尼系数增长曲线
Fig. 10 The building-up curves of equivalent viscous damping coefficient

由图 10 可知,加载过程中,两试件等效黏滞阻尼系数变化曲线均呈先上升后下降的趋势。屈服前,Z1、Z2 耗能能力大致相同;屈服后,Z2 的等效黏滞阻尼系数大于 Z1。说明混合配筋试件 Z2 具有比全碳素钢筋试件 Z1 更好的耗能能力。

综上可得,混合配筋能提高试件的承载力和耗能能力,而对刚度影响不大。故利用不锈钢筋与碳素钢筋在混凝土结构中的协同作用,可以满足抗震要求。

4 混合配筋混凝土空心墩柱抗震性能影响因素分析

通过有限元模拟得出,采用共同配置不锈钢与碳素钢筋这一配筋形式对混凝土结构抗震方面的研究是可行的。在此基础上,分别从高宽比、轴压比、纵筋配筋率等参数分析试件的骨架曲线、承载能力和延性等,对不锈钢-碳素钢筋混凝土空心墩柱的抗震性能展开进一步研究。

4.1 高宽比

高宽比在 4~10 变化时混合配筋墩柱 S1、S2 和 S3 的骨架曲线如图 11 所示。从图中可以看出,随着高宽比的增加,试件的屈服荷载下降,水平承载力降低,即试件的抗震性能与高宽比呈负相关。

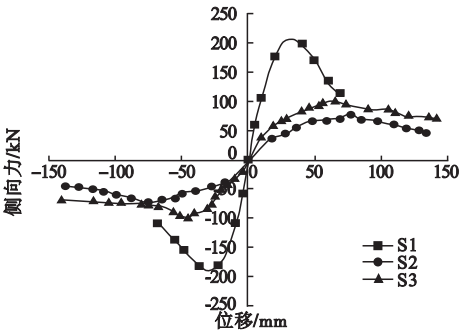


图 11 S1、S2 和 S3 骨架曲线

Fig. 11 Skeleton curves of S1, S2 and S3

试件的承载力和位移延性系数(即试件在侧向力作用下破坏位移与屈服位移的比值)见表 5。当高宽比介于 4~8 时,随着高宽比的增大,试件承载力呈下降趋势,而延性显著提升,当高宽比在 8~10 时承载力持续下降,延性几乎没有变化。显然较大的高宽比并不利于结构抗震。

表 5 试件承载力和延性系数

Table 5 Bearing capacity and ductility coefficient of specimens

试件编号	高宽比	屈服阶段		极限阶段		破坏阶段		位移延性系数
		荷载/kN	位移/mm	荷载/kN	位移/mm	荷载/kN	位移/mm	
S1	4	103.959	14.086	216.340	33.604	179.412	69.730	4.950
S2	8	53.558	25.660	99.855	64.728	83.563	140.182	5.463
S3	10	44.545	25.703	77.842	76.863	60.410	143.034	5.591

4.2 轴压比

轴压比在 0~1 变化时不同混合配筋混凝土空心墩柱骨架曲线如图 12 所示。

从图中可以看出,随着加载位移的增大,纵向钢筋发生屈曲同时混凝土剥落,荷载-位移曲线出现下降段,且轴压比越大,对下降段的下降幅度影响越明显。

试件的承载力和位移延性系数见表 6。从表中可以看出,当轴压比在 0.5~0.7 时,随着轴压比的增大,试件的承载力迅速提升,延性系数增大即延性有所提高;当轴压比超过 0.7 时,试件的承载力呈下降趋势,延性系数也缓慢减小。说明轴压比对试件的承载能力影响显著,对延性影响不大。

4.3 纵筋配筋率

纵筋配筋率在 1%~6% 变化时不同混合配筋混凝土空心墩柱骨架曲线如图 13 所示。从图中可以看出,纵筋配筋率在 1.5%~

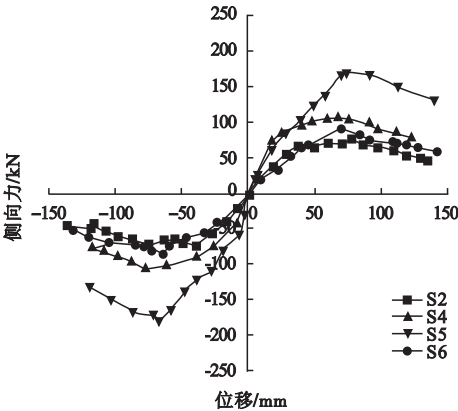


图 12 S2、S4~S6 试件骨架曲线

Fig. 12 Skeleton curves of S2 and S4~S6

表 6 试件承载力和延性系数

Table 6 Bearing capacity and ductility coefficient of specimens								
试件编号	高宽比	屈服阶段		极限阶段		破坏阶段		位移延性系数
		荷载/kN	位移/mm	荷载/kN	位移/mm	荷载/kN	位移/mm	
S2	0.3	53.558	25.660	99.855	64.728	83.563	140.182	5.463
S4	0.5	80.290	22.014	106.181	59.223	83.561	122.619	5.570
S5	0.7	86.712	25.320	166.871	69.218	132.258	139.674	5.631
S6	0.9	62.481	25.409	91.069	68.993	70.266	141.114	5.624

4.3%时,试件的水平承载力有所提高;当纵筋配筋率大于4.3%时,试件的水平承载力下降。说明纵筋配筋率超过一定范围时,不利于试件的抗震性能。

试件的承载力和位移延性系数见表7。从表中可以看出,延性系数起初呈增大趋势,试件的承载力显著提高。当纵筋配筋率大于4.3%时,试件的延性基本不变。故在纵筋配筋率介于1.5%~4.3%时,纵筋配筋率越高,试件的承载力越大,刚度退化越慢,变形能力越好。

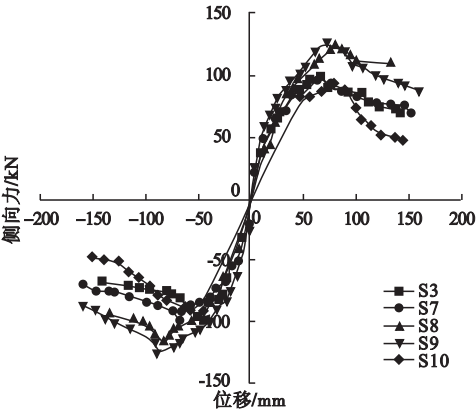


图 13 S3、S7~S10 试件骨架曲线

Fig. 13 Skeleton curves of S3 and S7~S10

表 7 试件承载力和延性系数

Table 7 Bearing capacity and ductility coefficient of specimens								
试件	纵筋配筋率	屈服阶段		极限阶段		破坏阶段		位移延性系数
		荷载/kN	位移/mm	荷载/kN	位移/mm	荷载/kN	位移/mm	
S3	0.015	44.545	25.703	77.842	76.863	60.410	143.034	5.591
S7	0.021	65.381	22.372	94.504	68.255	84.061	150.061	6.781
S8	0.032	49.866	18.740	123.017	81.347	108.691	128.594	6.803
S9	0.043	82.436	23.291	127.269	71.445	97.622	156.718	6.811
S10	0.056	80.650	21.074	96.724	72.452	59.549	143.601	6.750

5 结 论

(1)通过数值分析对两种配筋形式进行研究发现,混合配筋混凝土空心墩柱承载力较碳素钢筋混凝土空心墩柱承载力提高了41.47%,耗能能力也有所增强,而刚度变化大致相同。说明混合配筋可有效提高混凝土空心墩柱的综合抗震性能。

(2)改变高宽比对混合配筋混凝土空心墩柱的承载力及延性影响显著,高宽比宜在4~8,较大的高宽比并不利于结构抗震。不同轴压比对试件的承载能力影响显著,对延性影响不大,轴压比宜控制在0.5~0.7。同时控制纵筋配筋率在1.5%~4.3%时,适当提高纵筋配筋率可改善不锈钢-碳素钢筋混凝土空心墩柱的抗震性能。

参考文献

- [1] ZHANG H, XUE P, WANG D, et al. A novel approach to achieve high yield strength high nitrogen stainless steel with superior ductility and corrosion resistance [J]. Materials letters, 2019, 242: 91–94.
- [2] SAKURAGI T, YOSHIDA S, KATO O, et al. Study of stainless steel corrosion by hydrogen measurement under deoxygenated, low-temperature and basic repository conditions [J]. Progress in nuclear energy, 2016, 87: 26–31.
- [3] WU X, LI L L, LI H, et al. Effect of strain level on corrosion of stainless steel bar [J]. Construction and building materials, 2018, 163: 189–199.
- [4] MEDINA E, MEDINA J M, COBO A, et al. Evaluation of mechanical and structural behavior of austenitic and duplex stainless steel reinforcements [J]. Construction and building materials, 2015, 78: 1–7.
- [5] 王海龙, 凌佳燕, 孙晓燕, 等. 不锈钢筋混凝土柱小偏心受压性能[J]. 浙江大学学报(工学版), 2018, 52(10): 19–29.
(WANG Hailong, LING Jiayan, SUN Xiaoyan, et al. Performance of stainless steel reinforced concrete column under compression with small eccentricity [J]. Journal of Zhejiang university (engineering science), 2018, 52(10): 19–29.)
- [6] 赵勇, 张琛, 王晓峰. 配置高延性不锈钢钢筋混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(6): 803–810.
(ZHAO Yong, ZHANG Chen, WANG Xiaofeng. Experimental study on seismic performance of stainless steel reinforced concrete columns configured with high ductility [J]. Journal of tongji university (natural science edition), 2020, 48(6): 803–810.)
- [7] 张龙, 钱鹏, 张俊杰, 杨佳进, 等. 304 不锈钢钢筋混凝土梁受弯性能研究[J]. 山西建筑, 2019, 45(17): 36–37.
(ZHANG Long, QIAN Peng, ZHANG Junjie, et al. Study of flexural performance of 304 stainless steel reinforced concrete beams [J]. Shanxi construction, 2019, 45(17): 36–37.)
- [8] 高迪, 张辉, 王晓峰, 等. 配置高强不锈钢钢筋混凝土梁受弯承载力试验研究[J]. 建筑科学, 2018, 34(5): 40.
(GAO Di, ZHANG Hui, WANG Xiaofeng, et al. Experimental study on flexural capacity of reinforced concrete beams with high-strength stainless steel bars [J]. Building science, 2018, 34(5): 40.)
- [9] MARANAN G B, MANALO A C, BENMOKRANE B, et al. Flexural behavior of geopolymer-concrete beams longitudinally reinforced with GFRP and steel hybrid reinforcements [J]. Engineering structures, 2019, 182: 141–152.
- [10] REFAI A E, ABED F, AL-RAHMANI A. Structural performance and serviceability of concrete beams reinforced with hybrid (GFRP and steel) bars [J]. Construction and building materials, 2015(96): 518–529.
- [11] WUZ S, YANG Q, IWASHITA K, et al. Development of damage-controlled latter cast FRP-RC hybrid girders [J]. Composites part B: engineering, 2011, 42(6): 1770–1777.
- [12] 王元清, 高博, 戴国欣, 等. 焊接工字形截面不锈钢受弯构件的整体稳定性分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2010, 26(6): 1021–1026.
(WANG Yuanqing, GAO Bo, DAI Guoxin, et al. Analysis on overall stability of stainless steel beams with welded I-steel [J]. Journal of Shenyang jianzhou university (natural science), 2010, 26(6): 1021–1026.)
- [13] 李承昌, 穆明浩, 聂昌信, 等. 不锈钢筋的力学及工艺性能[J]. 公路交通科技, 2016, 33(12): 1–5.
(LI Chengchang, MU Minghao, NIE Changxin, et al. Mechanical and technological properties of stainless steel bars [J]. Road traffic technology. 2016, 33(12): 1–5)
- [14] 徐春一, 苑永胜, 逯彪, 等. 双相体不锈钢筋与混凝土锚固设计及可靠度分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2019, 35(3): 445–452.
(XU Chunyi, YUAN Yongsheng, LU Biao, et al. Anchorage design and reliability analysis of duplex stainless reinforcing steel [J]. Journal of Shenyang jianzhou university (natural science), 2019, 35(3): 445–452.)
- [15] 韩强, 周雨龙, 杜修力. 钢筋混凝土矩形空心桥墩抗震性能[J]. 工程力学, 2015(3): 28–40.
(HAN Qiang, ZHOU Yulong, DU Xiuli. Seismic performance of reinforced concrete rectangular hollow bridge piers [J]. Engineering mechanics, 2015(3): 28–40.)
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
(Ministry of Construction of the PRC. Design code for concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.)

(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)