

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.02.019



配置 600 MPa 级高强钢筋 T 形柱 抗震性能试验研究

戎贤, 段微微, 王浩

(河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300401)

摘要: 600 MPa 级钢筋是一种新型高强度钢筋, 为研究该钢筋应用于异形柱结构体系的可行性, 对 7 根不同轴压比、体积配箍率和钢筋强度的混凝土 T 形柱试件进行低周往复荷载试验, 分别对其承载力、位移、滞回曲线、骨架曲线、刚度退化和耗能性能进行研究, 综合评估其抗震性能。研究表明: 配置 600 MPa 级钢筋的混凝土 T 形柱具有良好的变形能力和承载能力, 提高配箍率能有效提高试件的抗震性能, 提高轴压比可以提高试件的承载力, 但降低其变形能力。随着钢筋强度的提高, 试件的承载力显著提高。

关键词: T 形柱; 600 MPa 级钢筋; 抗震性能; 低周反复荷载

中图分类号: TU375.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2017)02-0148-07

Experimental analysis of seismic behavior of 600 MPa RC T-shaped columns

Rong Xian, Duan Weiwei, Wang Hao

(School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, P. R. China)

Abstract: 600 MPa steel bar was a new type of high-strength reinforcing bar. Seven T-shaped column specimens varying in stirrup ratios, axial compression ratios and steel strength were tested under low cyclic loading to investigate the feasibility of using this type of reinforcement in specially shaped column. Behaviors in bearing capacity, displacement, hysteretic behavior, skeleton characteristic, rigidity degradation and energy dissipation were investigated to analysis the seismic performance of columns. The results showed that 600 MPa RC T-shaped columns had favorable deformation capacity and bearing capacity. Improving stirrup ratios could effectively improve the seismic performance. With the increase of axial compression ratios, the bearing capacity of columns was bigger, but the deformation capacity deteriorated. With the improvement of the strength of steel, bearing capacity, deformation capacity significantly increased.

Keywords: T-shaped column; 600 MPa; Seismic behavior; Low cyclic loading

异形柱结构体系具有减少结构自重、节约材料、增大使用面积等优点^[1-3], 广泛应用于中国各地, 对

异形柱框架及节点的试验研究^[4-6]表明, 异形柱构件是整个结构体系抗震性能的关键部位, 而 T 形柱由

收稿日期: 2016-08-25

基金项目: 河北省自然科学基金(E2015202035); 河北省建设科学技术研究计划(2014-122)

作者简介: 戎贤(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事结构抗震研究, (E-mail) xrong516@126.com

Received: 2016-08-25

Foundation item: Natural Science Foundation of Hebei Province(No. E2015202035); Construction Science and Technology Research of Hebei Province(2014-122)

Author brief: Rong Xian (1965-), professor, doctoral supervisor, main research interest: aseismic structures, (E-mail) xrong516@126.com.

于其截面的不规则性使得抗震性能较为复杂,有必要进行更深入的试验研究。研究者对高强钢筋混凝土构件进行了一些抗震性能试验研究^[7-10],研究表明,进行合理设计的配置高强钢筋的混凝土构件在强度和变形上表现出与传统钢筋混凝土构件相似的性能;在中国,600MPa 级钢筋是一种新型钢筋,具有强度高、延性好等特点^[11-14],现已被纳入《钢筋混凝土用热轧带肋钢筋》(GB 1499. 2—2013)中,但是部分混凝土规范^[15-16]还未涉及此类钢筋。为改善异形柱抗震性能并推广 600 MPa 级高强钢筋的应用,对配置 600 MPa 级高强钢筋的混凝土 T 形柱试件进行低周往复荷载试验,研究其抗震性能并对比分析轴压比、体积配箍率和钢筋强度对抗震性能的影响。

1 试验概况

试验设计了 7 根 1/2 缩尺的 T 形截面混凝土异形柱试件,以轴压比、体积配箍率和钢筋强度为变化参数。试件设计参数如表 1 所示。柱肢截面尺寸为 350 mm×350 mm,肢宽肢厚比均为 2.9,试件的剪跨比均为 3.29,试件几何尺寸及配筋如图 1 所示。测量混凝土立方体抗压强度并取得实测平均值为 60.1 MPa,根据《混凝土结构试验方法标准》(GB/T 50512—2012)中的相关公式,计算出混凝土轴心抗压强度实测平均值 48.1 MPa 以及弹性模量 36 GPa。试件纵筋和箍筋直径分别为 16、8 mm,钢筋力学性能见表 2。

表 1 设计参数

Table 1 Design parameters of specimens

试件编号	纵筋	箍筋	配箍特征值	轴压比
CT1	10E16	E8@60	0.304	0.24
CT2	10E16	E8@90	0.203	0.24
CT3	10E16	E8@120	0.152	0.24
CT4	10E16	E8@90	0.203	0.19
CT5	10E16	E8@90	0.203	0.29
CT6	10E16	E8@90	0.203	0.34
CT7	10D16	D8@90	0.135	0.24

注:E 表示 600 MPa 级钢筋强度等级,D 表示 HRB500 级钢筋。

表 2 钢筋的力学性能

Table 2 Properties of reinforcing bars

钢筋规格	屈服强度/MPa	极限强度/MPa
600 MPa(8 mm)	626	
600 MPa(16 mm)	640	817
HRB500(8 mm)	520	800
HRB500(16 mm)	586	743

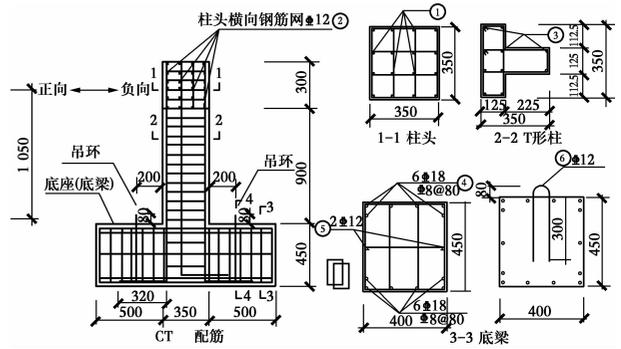


图 1 试件尺寸和配筋

Fig. 1 Details of specimen/mm

试验采用拟静力加载,加载装置和加载程序如图 2 所示。采用荷载和位移混合控制的加载制度,首先用竖向千斤顶在异形柱上端施加压力并保持恒定,水平加载分为两个阶段:荷载控制和位移控制。在试件屈服前采用荷载控制,每级循环一次,当钢筋屈服后采用位移控制,以屈服位移整数倍循环 3 次,直到荷载下降到极限荷载的 85% 时,试验结束。

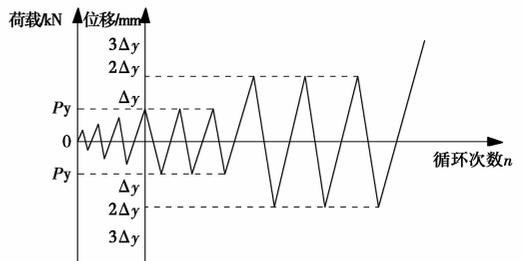
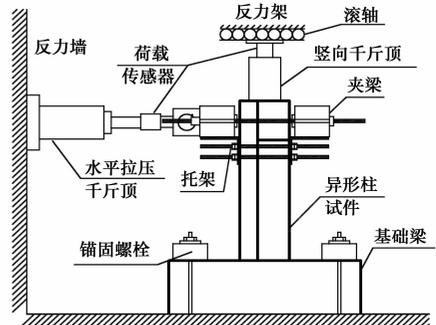


图 2 加载装置及加载程序

Fig. 2 Loading equipment and loading system

2 破坏特征

各试件的裂缝发展情况与破坏形式基本一致,部分试件破坏形态如图 3 所示。

在试件屈服前,腹板和翼缘正面柱脚处首先出现微小水平裂缝,随着荷载的增加,水平裂缝不断延伸并向腹板侧面斜向发展形成斜裂缝,钢筋屈服后,试件出现残余变形,裂缝继续扩展,腹板侧面出现交叉裂缝,受压区混凝土沿竖向裂缝不断起皮脱落,试

件达到最大承载力,此后变形继续增大而荷载减小直到钢筋屈曲、腹板柱底混凝土压碎,试件破坏。

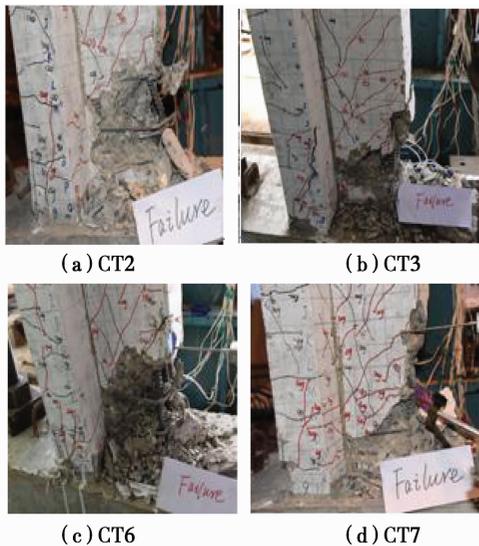


图 3 试件破坏形态

Fig. 3 Failure characteristic of specimen

轴压比较大的试件裂缝和柱底塑性铰出现的较晚,斜裂缝倾角较小,混凝土压碎更为严重,但试件的承载力有所提高,表明增大轴压比可以改善骨料

的咬合作用并推迟裂缝的产生。配箍特征值较大的试件,斜裂缝出现较晚,裂缝数量增多而宽度减小,能够缓解柱底混凝土压溃现象,承载力有所提高。钢筋强度高的试件,裂缝数量较少,混凝土剥落长度较大,但塑性铰长度较小,说明随着钢筋强度提高,试件塑性性能降低。

3 试验结果分析

3.1 试件主要试验结果

极限位移角是表征试件变形能力的重要指标,但各学者对极限位移的定义各不相同,李静等^[17]是取水平力下降到峰值 85% 时对应的位移来研究柱的变形能力,顾冬生等^[18]取峰值荷载所对应的位移来计算极限位移角,对于高强钢筋混凝土柱,王君杰等^[19]用各加载阶段的位移角来综合评估试件的变形能力,采用此种方法评价试件的变形能力。各试件主要研究结果如表 3 所示。其中,正向荷载指 T 形柱腹板侧受拉的荷载,反向荷载指 T 形柱翼缘侧受拉的荷载,屈服荷载通过等面积法确定,破坏荷载为经历最大承载力后下降到极限荷载 85% 时对应的荷载值。

表 3 试件主要试验结果
Table 3 Test results of specimens

试件		屈服			极限			破坏		
		荷载/kN	位移/mm	位移角/rad	荷载/kN	位移/mm	位移角/rad	荷载/kN	位移/mm	位移角/rad
CT1	正向	125.01	15.78	0.015	151.68	37.65	0.036	128.93	48.9	0.047
	反向	161.71	9.15	0.009	198.38	25.49	0.024	168.63	28.11	0.027
	平均	143.36	12.47	0.012	175.03	31.57	0.030	148.78	38.51	0.037
CT2	正向	176.09	13.34	0.013	207.16	38.39	0.037	176.09	45.54	0.043
	反向	148.11	11.27	0.011	178.37	24.1	0.023	151.61	29.33	0.028
	平均	162.1	12.31	0.012	192.77	31.24	0.030	163.85	37.44	0.036
CT3	正向	145.51	13.2	0.013	164.32	37.15	0.035	139.68	44.51	0.042
	反向	181.01	13.67	0.013	212.08	21.72	0.021	180.26	25.18	0.024
	平均	163.26	13.44	0.013	188.2	29.44	0.028	159.97	34.85	0.033
CT4	正向	135.19	15.34	0.015	161.16	40	0.038	136.99	53.13	0.051
	反向	172.05	10.82	0.010	208.57	26.31	0.025	177.28	27.41	0.026
	平均	153.62	13.08	0.012	184.86	33.15	0.032	157.13	40.27	0.038
CT5	正向	151.97	17.88	0.017	182.93	36.94	0.035	155.49	44.53	0.042
	反向	163.3	6.4	0.006	204.35	19.29	0.018	173.7	22.32	0.021
	平均	157.64	12.14	0.012	193.64	28.11	0.027	164.6	33.43	0.032
CT6	正向	191.92	19.37	0.018	226.12	38.95	0.037	192.2	42.98	0.041
	反向	170.73	6.82	0.006	211.73	23.01	0.022	179.97	23.44	0.022
	平均	181.33	13.1	0.012	218.92	30.98	0.030	186.08	33.21	0.032

续表 3

试件	屈服			极限			破坏			
	荷载/kN	位移/mm	位移角/rad	荷载/kN	位移/mm	位移角/rad	荷载/kN	位移/mm	位移角/rad	
CT7	正向	140.1	15.99	0.015	162.57	45.26	0.043	138.18	45.26	0.043
	反向	156.6	7.66	0.007	186.45	16.51	0.016	158.48	26.67	0.025
	平均	148.35	11.83	0.011	174.51	30.89	0.029	148.33	35.97	0.034

从表 3 可知:

1) 由于 T 形截面柱正负向性能的不同, 正负向荷载和位移具有不对称性, 负向加载时的屈服和极限荷载较正向有不同程度的提高。

2) 对比轴压比相同, 配箍率不同的试件, 试件 CT1 和 CT2 较 CT3 的破坏位移分别提高 9.5% 和 7.4%, 表明加密箍筋可以增强核心混凝土抵抗横向变形的能力, 缓解试件斜裂缝的出现, 提高试件的承载力, 随着箍筋间距的增大, 破坏位移角随之减小, 说明提高配箍率可以提高试件变形能力。

3) 对比配箍率相同, 轴压比不同的试件 CT4、CT5 和 CT6, 随着轴压比的增大, 试件承载力明显提高, 而极限位移减小。

4) 对比只钢筋强度不同的试件, 配置 600 MPa 级钢筋的试件 CT2 较配置 HRB500 钢筋的 CT7 的屈服位移角、极限位移角平均值较大, 但随着塑性变形的发展, 两试件的变形差异逐渐缩小, 说明配置 600 MPa 级钢筋的混凝土 T 形柱具有良好的变形能力。

5) T 形试件(除 CT2 和 CT6 试件)的负向极限荷载均相对正向极限荷载较高, 分析试件 CT2 与 CT6 反常的原因可能为: CT2 试件混凝土的浇筑不密实, 导致负向极限承载力较低; CT6 试件为高轴压比试件, 轴压比达到 0.34, 而试件 CT4、CT5 和 CT6 的负向极限承载力与正向极限承载力的比值分别为 1.29、1.12、0.94, 可以看出, 轴压比的增大能提高承载力的同时, 对 T 形截面柱正反向承载力提高的程度是不同的, 在一定程度上可以缓解正负向承载力不对称的现象, 当轴压比较高时, 对正向承载力提高程度过大, 可能出现负向极限荷载低于正向极限荷载的情况。

3.2 T 形截面偏心受压构件正截面承载力验算

T 形截面偏心受压柱的破坏特征及基本假定与矩形截面柱相同, 可按照规范^[15]矩形截面偏心受压试件正截面承载力的计算方法进行计算, 由于 T 形截面柱截面形状不规则, 计算中只考虑腹板端部纵向受力钢筋的作用。以 T 形截面翼缘受压为正方

向, 腹板受压为负方向进行计算, 计算的弯矩值与试验弯矩值如表 4 所示。

表 4 承载力试验值与计算值对比

Table 4 Test and calculative results of bearing capacity

弯矩/ (kN·m)	正方向			负方向		
	计算值	试验值	试验值/ 计算值	计算值	试验值	试验值/ 计算值
CT1	236.66	178.91	0.76	217.38	220.62	1.01
CT2	236.66	239.52	1.01	217.38	200.86	0.92
CT3	236.66	193.18	0.82	217.38	233.60	1.07
CT4	201.44	187.41	0.93	206.09	230.45	1.12
CT5	270.18	217.03	0.80	223.94	226.51	1.01
CT6	301.52	275.76	0.91	225.77	241.83	1.07
CT7	208.62	190.89	0.92	208.73	201.23	0.96

计算中试件正方向均是大偏压破坏, 负方向均是小偏压破坏, 此时仅考虑翼缘端部和腹板端部受力钢筋的作用进行计算。在正方向计算过程中, 各试件受压区均在翼缘范围内, 按照翼缘宽度所形成的矩形进行承载力计算时, 没有考虑腹板宽度相对矩形宽度的削弱作用, 除 CT2 试件外, 其他试件的计算值均偏小, 但由表可知, 各试件计算值与试验值的差距不大; 在负方向小偏压计算时, CT2 和 CT7 由于试件混凝土不密实导致计算值比试验值略小, 各试件的计算值与试验值吻合较好, 差值均在 15% 以内。综合而看, 对于配置 600 MPa 级钢筋的 T 形截面柱, 其受弯承载力计算方法仍可以按照现行规范进行, 适用于既有 T 形截面柱。

3.3 滞回曲线

各试件水平荷载-柱顶位移滞回曲线如图 4 所示。分析滞回曲线能够反映出 T 形截面柱的以下特点:

1) 加载初期, 试件处于弹性阶段, 滞回曲线基本成直线, 试件出现裂缝后, 由于裂缝在翼缘和腹板分布的不同造成试件正负向刚度的差异, 滞回曲线出现不对称现象, 试件屈服后, 加载刚度与卸载刚度逐渐降低, 随着位移幅值的增大及循环次数的增多, 退

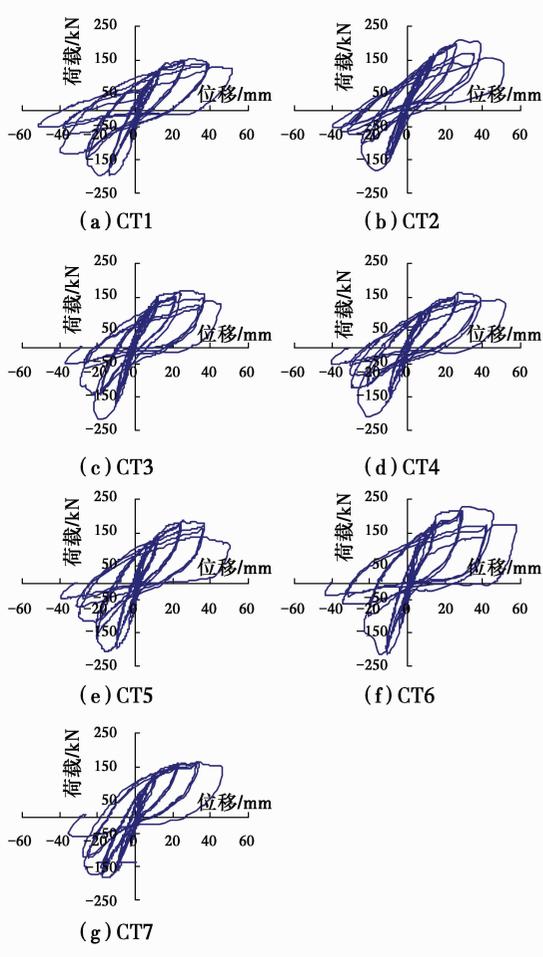


图 4 各试件滞回曲线

Fig. 4 Hysteretic loops of specimens

化现象愈加剧烈。同一滞回环中负向水平荷载的衰减早于正向,且衰减速率较大。综上所述,配置 600 MPa 级钢筋的混凝土 T 形柱具有良好的承载力,刚度和强度退化比较平缓。

2) 配箍间距小的试件,滞回曲线相对较为饱满,裂缝宽度较小且曲线下降段较平缓,试件变形较大,因此加密箍筋可以增加滞回曲线的饱满程度。

3) 轴压比较小的试件,滞回曲线较为饱满,极限变形能力增大,极限荷载后,试件的强度和刚度退化较慢。

3.4 骨架曲线

在滞回曲线中,将每级循环的峰点连接起来形成的包络线为骨架曲线,各试件的骨架曲线如图 5 所示,由此可以发现以下特点:

1) 加载初期,试件处于弹性阶段,各试件侧向刚度较为稳定,骨架曲线近似重合,随着加载的不断进行,试件变形增大速率大于荷载增大速率,骨架曲线斜率减小,不同试件的荷载变形曲线逐渐分离,直到

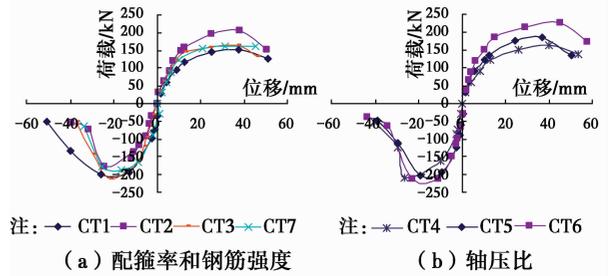


图 5 各试件骨架曲线

Fig. 5 Skeleton curves of the specimens

荷载峰值,随后表现出明显的刚度和强度退化特征。此外,各试件正负向骨架曲线呈现明显的不对称性,在破坏阶段,负向加载时荷载下降较为迅速,曲线下下降曲率较为一致。

2) 对比只配箍率不同的试件,CT1 的变形较大,负向加载时曲线下下降较为平缓,表明试件强度降低较小。

3) 对比只轴压比不同的试件可以发现,随着轴压比的提高,骨架曲线趋于对称,极限承载力提高,但相同荷载下的位移较小,变形能力变差。

4) 对比 CT2 和 CT7 试件,配置 600 MPa 级钢筋的 CT2 较配置 HRB500 钢筋的 CT7 具有更高的承载力,CT2 试件负向加载时荷载下降的也较为缓慢。

3.5 刚度退化

取试件顶点的抗侧移刚度来表征试件的刚度退化特征,各试件刚度-位移曲线如图 6 所示,由图可以发现 T 形截面柱的以下特点:

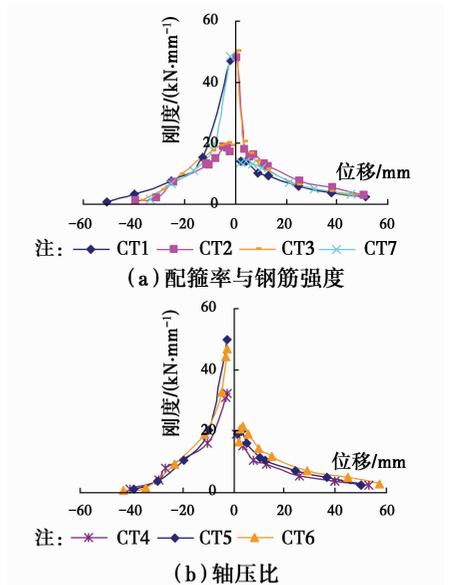


图 6 各试件刚度退化曲线

Fig. 6 Curves of stiffness degradation

1)各试件的正负向初始刚度有一定的差距,由于试件本身的不对称性及加载时某一个方向先损伤使得试件刚度表现出不对称现象,随着加载的不断进行,裂缝的开展与闭合引起的截面削弱及钢筋混凝土之间的锚固滑移作用,使试件正负向刚度趋于一致。

2)随着轴压比的提高,试件负向刚度不断提高,刚度出现缓降时的位移减小,而正向刚度曲线较为一致且轴压比大的试件正向刚度也较大,说明提高轴压比可以提高试件整体刚度,轴压比较小的试件后期抗震性能更稳定。

3)配置 600 MPa 级钢筋的 CT2 较配置 HRB500 钢筋的 CT7 刚度出现缓降时位移较小,说明配置 HRB500 钢筋的 CT7 后期抗震性能更稳定。配箍率对刚度退化的影响效果不显著。

3.6 耗能性能

结构或试件在反复荷载作用下通过材料内部损伤将能量转化为热能释放,可以用等效黏滞阻尼系数 h_e 来衡量结构或试件的耗能能力。各试件的耗能系数如 7 所示。

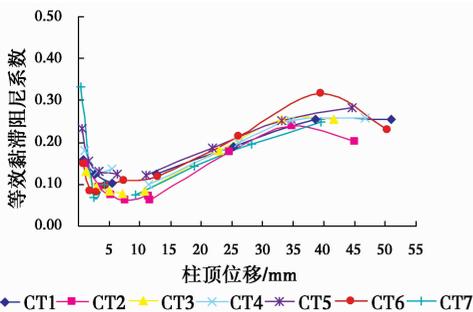


图 7 各试件等效黏滞阻尼系数与加载级数的关系曲线

Fig. 7 Curves of equivalent viscous damping coefficient of the specimens

对比分析各试件等效黏滞阻尼系数曲线,可以发现:

1)在弹性阶段,试件的残余变形很小,且各试件的等效黏滞阻尼系数均较小,试件屈服后各试件等效黏滞阻尼系数迅速增长。

2)配箍率较大的试件 CT1 相对试件 CT2 和 CT3,在弹性阶段和弹塑性初期阶段耗能较大,但配箍率对耗能系数的影响并不显著。

3)随着轴压比的提高,试件的平均耗能水平有所提高,而随着钢筋强度的提高,试件在相同位移下弹性耗能越来越多且增长速率高于塑性耗能的增长速率,故对试件耗能能力无明显影响。

4 结论

通过对配置 600 MPa 级钢筋 T 形柱的抗震性能进行试验分析,可以得出以下结论。

1)600 MPa 级钢筋与混凝土能够很好的协同工作,试验过程中没有发生脆性破坏,配置 600 MPa 级钢筋 T 形柱具有良好的变形和承载力,刚度和强度退化比较平缓。

2)对于配置 600 MPa 级钢筋的 T 形截面柱,其受弯承载力计算方法仍可以按照现行规范进行,适用于既有 T 形截面柱。

3)提高配置 600 MPa 级钢筋 T 形柱的配箍率,可以使滞回曲线更为饱满,提高试件承载力、变形能力和延性;提高配置 600 MPa 级钢筋 T 形柱的轴压比,试件承载力、平均耗能水平有所提高。

4)随着钢筋强度的提高,T 形柱的承载力显著提高,对试件耗能能力无明显影响。

参考文献:

- [1] 戎贤,张健新,李艳艳. 配置 HRB500 钢筋的混凝土异形柱抗震性能试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2013, 39(3): 161-165.
- [2] RONG X, ZHANG J X, LI Y Y. Experimental research on seismic behavior of HRB500 RC specially shaped columns[J]. Sichuan Building Science, 2013, 39(3): 161-165. (in Chinese)
- [3] 王亚雯,陈志华,周婷,等. 反复荷载下方钢管混凝土组合异形柱参数分析[J]. 地震工程与工程震动, 2014, 34(3): 117-132.
- [4] WANG Y W, CHEN Z H, ZHOU T, et al. Parametric analysis of special-shaped column composed of concrete-filled square steel tubes under cyclic loading [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(3): 117-132. (in Chinese)
- [5] WANG T C, LIU X, ZHAO H L. Experimental research on seismic behavior of +-shaped columns reinforced with high-strength steel bars under cyclic loading [J]. Journal of Civil Engineering, 2015, 19(4): 982-993
- [6] RONG X, ZHANG J X, LI Y Y. Experimental research on seismic behavior of interior joints of specially shaped columns reinforced by fiber [J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 94-96: 551-555
- [7] 戎贤,仇庆文,赵玉婷. 混凝土异形柱框架角柱突然失效模拟试验研究[J]. 工业建筑, 2015, 45(9): 64-67.
- [8] RONG X, ZHANG Q W, ZHAO Y T. Experimental

- research on sudden failure of one corner column of RC special-shaped columns frame [J]. Industrial Construction, 2015, 45(9): 64-67. (in Chinese)
- [6] RONG X, ZHANG J X, LI Y Y. Seismic behavior of specially shaped column joints with X-shaped reinforcement [J]. Transactions of Tianjin University, 2013, 19: 110-117.
- [7] LEPAGE A, TAVALLALI H, PUJOL, et al. High-performance steel bars and fibers as concrete reinforcement for seismic-resistant frames [J]. Advances in Civil Engineering, 2012, 2012(5): 1-13.
- [8] RAUTENBERG J M, PUJOL S, et al. Reconsidering the use of high-strength reinforcement in concrete Columns [J]. Engineering Structures, 2012, 37(4): 135-142.
- [9] HASSAN T K, SELIEM H M, et al. Shear behavior of large concrete beams reinforced with high-strength steel [J]. ACI Structural Journal, 2008, 105(2): 173-179.
- [10] OUSALEM HASSANE, TAKATSU, HIROTO, et al. Use of high-strength bars for the seismic performance of high-strength concrete columns [J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2009, 7(1): 123-134.
- [11] 戎贤, 刘旭, 刘平. 配置 600MPa 钢筋的无黏结部分预应力梁受弯性能试验研究 [J]. 工业建筑, 2015, 45(9): 59-63.
RONG X, LIU X, LIU P. Experimental research on the seismic performance of L-shaped cross section on steel reinforced concrete short columns [J]. Industrial Construction, 2015, 45(9): 59-63. (in Chinese)
- [12] 张健新, 戎贤, 刘平. 配置 600 MPa 钢筋的有黏结部分预应力混凝土梁变形性能试验研究 [J]. 工业建筑, 2016, 46(4): 65-68.
ZHANG J X, RONG X, LIU P. Experimental research on deformation behavior of bonded partially prestressed concrete beams with 600 MPa steel bars [J]. Industrial Construction, 2016, 46(4): 65-68. (in Chinese)
- [13] 戎贤, 王海涛, 刘平. 配置 600 MPa 级钢筋混凝土梁受弯性能试验研究 [J]. 河北工业大学学报, 2015, 44(5): 86-89.
RONG X, WANG H T, LIU P. Experimental study on bending behavior of reinforced concrete beam with 600MPa steel bar [J]. Journal of Hebei University of Technology, 2015, 44(5): 86-89. (in Chinese)
- [14] 李强, 戎贤, 李艳艳. 配置 HRB600 钢筋的部分预应力混凝土梁疲劳试验研究 [J]. 建筑结构, 2016, 46(2): 8-11.
LI Q, RONG X, LI Y Y. Experimental study on fatigue behavior of partially prestressed concrete beams with HRB600 steel bars [J]. Building Structure, 2016, 46(2): 8-11. (in Chinese)
- [15] 中华人民共和国建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
The Ministry of Construction of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB 50010-2010 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010. (in Chinese)
- [16] 中华人民共和国建设部. 混凝土异形柱结构技术规范: JGJ 149—2006 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
The Ministry of Construction of the People's Republic of China. Technical specification for concrete structures with specially shaped columns: JGJ 149-2006 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2006. (in Chinese)
- [17] 李静, 钱稼茹, 蒋剑彪. 往复水平力作用下 CFS 约束混凝土柱变形能力试验研究 [J]. 混凝土, 2004(8): 22-26.
LI J, QIANG J R, JIANG J B. Experimental study on deformation capacity of CFS confined concrete columns subjected lateral loading [J]. Concrete, 2004(8): 22-26. (in Chinese)
- [18] 顾冬生, 吴刚. 地震荷载作用下 FRP 加固钢筋混凝土圆柱变形能力计算方法研究 [J]. 工程力学, 2013(1): 261-270.
GU D S, WU G. Deformation capacity of FRP retrofitted circular concrete columns under simulated seismic loading [J]. Engineering Mechanics, 2013(1): 261-270. (in Chinese)
- [19] 王君杰, 苏俊省, 王文彪, 等. 配置 HRB500E, HR600 钢筋的混凝土圆柱抗震性能试验 [J]. 中国公路学报, 2015, 28(5): 93-100
WANG J J, SU J S, WANG W B, et al. Experimental on seismic performance of circular concrete columns reinforced with HRB500E, HRB600 steel [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(5): 93-100 (in Chinese)