

文章编号: 1008-1542(2011)01-0082-06

T 形和 L 形柱低剪跨比正反向受剪特性研究

李其廉, 张学辉, 郑世夺

(河北科技大学建筑工程学院, 河北石家庄 050018)

摘 要: 由于 T 形和 L 形柱特殊的截面形式, 正反受剪时存在腹板和翼缘分别受压和受拉 2 种状态, 其正反受剪承载力和变形能力往往存在差异, 且剪跨比越小这种差异越显著。对剪跨比 $\lambda=2.5$ 时的 T 形和 L 形柱进行低周反复荷载试验, 分析了低剪跨比状态下 T 形和 L 形柱正反加载破坏特征、承载能力、变形能力和延性、刚度退化等抗震性能指标。研究表明, T 形和 L 形柱正反 2 个方向受剪承载能力和变形能力存在显著差异, 腹板受压时, 柱脚腹板混凝土破坏严重, 降低了异形柱的截面刚度和承载力, 成为异形柱结构的薄弱部位。

关键词: 异形柱; 剪跨比; 抗震性能; 低周反复荷载

中图分类号: TU375.4 文献标志码: A

Research in shear behavior of T and L-shaped columns with low shear-span ratio under forward and reverse loading

LI Qi-lian, ZHANG Xue-hui, ZHENG Shi-duo

(College of Civil Engineering and Architecture, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang Hebei 050018, China)

Abstract: Due to the special section of T and L-shaped columns, the web and the flange will bear pressure or tension under forward and reverse load. The shear capacity and deformation capacity are different under forward and reverse load, and when the shear-span is lower the difference is more obvious. Through low frequency cyclic loading experiment of T and L-shaped columns while the shear-span is 2.5, this paper investigated the failure characteristic, shear capacity, deformation capacity and rigidity degeneracy of the T and L-shaped columns with low shear-span ratio. The results show that the shear capacity and deformation capacity of the T and L-shaped columns are obviously different under forward and reverse load. The web concrete in column foot will be damaged seriously under pressure, which reduces the section stiffness and shear capacity, so the column foot may become the weak position of specially shaped columns.

Key words: specially shaped columns; shear-span ratio; seismic behavior; low frequency cyclic loading

采用 L 形、T 形及十字形等异形截面柱可以避免房间边角因采用矩形柱时所产生的棱角突出, 使房间平整、布置灵活, 具有良好的发展前景。目前世界上对各种截面形式的异形柱构件正截面承载力进行了大量试验和理论研究, 取得了丰富的研究成果^[1-6]。中国国内对 L 形、T 形和十字形柱构件斜截面受剪承载力也进行了相关试验研究, 对异形柱斜截面承载力特性有了一定的共识^[7-14]。由于异形柱正截面存在翼缘和腹板 2 部分, 且 T 形柱仅有一个对称轴, L 形柱没有对称轴, 正反受剪时存在腹板和翼缘分别受压和受拉 2 种状态, 故其正反受剪承载力与十字形柱相比差异较大。通过阅读文献可发现, 低周反复加载时 T 形和 L 形柱滞回曲

收稿日期: 2010-09-02; 修回日期: 2010-11-15; 责任编辑: 冯 民

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50878141); 河北省教育厅自然科学基金资助项目(Z2010250); 河北省科技厅自然科学基金资助项目(10215677)

作者简介: 李其廉(1965), 男, 河北临西人, 高级工程师, 硕士, 主要从事建筑物检测方面的研究。

线和骨架曲线存在不对称现象,即正反 2 个方向的承载能力和变形能力不对称,不同文献中 T 形和 L 形柱滞回曲线不对称程度有所差异。研究表明,由于 T 形柱和 L 形柱自身的截面特性,其正反向承载能力和变形能力不对称性是不可避免的。

笔者通过阅读文献,初步总结出影响 T 形和 L 形柱正反向滞回曲线不对称的主要因素为剪跨比,另外轴压比、暗柱^[14]等因素对 T 形和 L 形柱正反向滞回曲线不对称程度也有所影响。框架柱端一般同时存在着弯矩 M 和剪力 V ,定义 $\lambda = M/Vh_0$ 为广义剪跨比, a/h_0 为狭义剪跨比,其中 h_0 为柱截面有效高度, a 为剪力作用点到柱端的距离。根据剪跨比 λ 不同,可将柱分为长柱($\lambda > 2$)、短柱($1.5 < \lambda < 2$)和极短柱($\lambda \leq 1.5$),剪跨比越大,框架柱易发生弯曲破坏,剪跨比越小,框架柱易发生剪切破坏。笔者所研究的剪跨比为狭义剪跨比,即剪力作用点到柱底的距离与异形柱腹板有效高度的比值。通过对比 T 形柱已有文献可以初步认为:狭义剪跨比小于 3.0 时,T 形柱随剪跨比的减小逐渐表现出剪切破坏特征,其正反向斜截面受剪承载力和变形能力存在显著的不对称特性^[10-11];狭义剪跨比大于 3.0 时,T 形柱随剪跨比的增大逐渐表现出弯曲破坏特征,其正反向斜截面受剪承载力不对称性不再显著^[12]。L 形柱与 T 形柱相同,也有类似特征。

因此笔者设计制作了 T 形柱和 L 形柱,并对其进行低周反复荷载试验,研究剪跨比为 2.5 左右时,T 形柱和 L 形柱的破坏特征、承载力、变形能力和延性、刚度退化等抗震性能指标。

1 T 形和 L 形柱试验研究

1.1 试验概况

T 形和 L 形柱模型及配筋情况如图 1 所示(图中数据单位为 mm),其中异形柱纵筋为 HRB400 级钢筋,箍筋为 HPB235 级钢筋,混凝土强度等级为 C45。

T 形柱顶端轴力为 300 kN,轴压比为 0.198;L 形柱顶端轴压力为 200 kN,轴压比为 0.132,2 个异形柱的剪跨比均为 2.5 左右。加载制度为荷载-位移联合控制,即施加的水平荷载在试件屈服前,采用荷载控制,分 3—5 级加载至结构屈服,每级加载、卸载、反向加载、再卸载循环 1 次;试件屈服后采用位移控制,并以屈服位移的整数倍加载、卸载、反向加载、再卸载循环 3 次,当竖向力下降到最大荷载的 85% 时即认为试件破坏,试验结束。

1.2 破坏特征

T 形柱:试验过程中,始终对混凝土裂缝开展及破坏情况进行观测,当正向荷载加至 50 kN 时,柱腹板两侧同时出现多条剪切裂缝,随着荷载的增大,混凝土裂缝不断向下延伸,裂缝宽度不断增大,且腹板内又陆续出现多条剪切裂缝,这些裂缝多集中在构件中下部;当反向加载至 110 kN 时,T 形柱底翼缘外侧出现第 1 条水平弯曲裂缝,反向加载至 130 kN 后,翼缘外侧水平裂缝不断增多;荷载加至正向 150 kN 时,腹板内斜裂缝开始向下逐渐延伸至翼缘内,当正向加载至 2Δ 时,腹板外侧陆续出现数条水平弯曲裂缝;而反向加载过程中,翼缘外侧水平弯曲裂缝发展缓慢;正向加载至 3Δ 时,T 形柱底腹板混凝土保护层逐渐出现竖向裂缝,局部混凝土压碎剥落,随着变形的不断增大,柱底腹板混凝土保护层破坏较严重,柱底纵筋外露;反向加载至 3Δ 时,柱底翼缘外侧混凝土保护层也出现局部压碎破坏现象。试验结束时,T 形柱底腹板混凝土破坏情况较翼缘外侧混凝土破坏更为严重,T 形柱底腹板和翼缘混凝土破坏情况如图 2 所示。

L 形柱:当正向荷载加至 50 kN 时,柱下部腹板两侧同时出现 1 条弯曲裂缝;当正向荷载加至 70 kN 时,柱腹板中下部陆续出现多条剪切斜裂缝;反向加载至 70 kN 时,柱底翼缘外侧出现 2 条水平弯曲裂缝;随着正向荷载的不断增大,腹板中斜裂缝不断向两侧开展延伸,且裂缝宽度不断增大,反向加载过程中,翼缘外侧水平裂缝开展缓慢,且裂缝宽度较小;当正向和反向加载均达到 Δ 后,翼缘外侧裂缝逐渐延伸至腹板外侧并

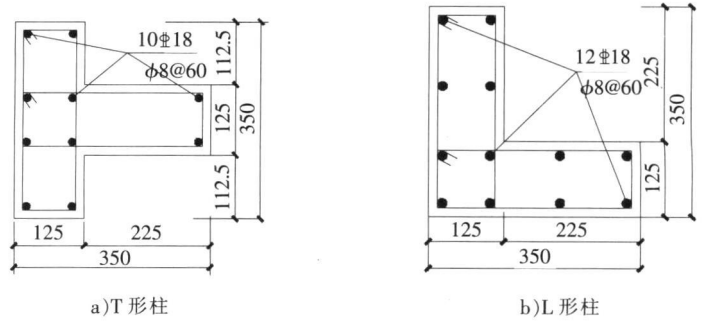


图 1 T 形和 L 形柱配筋情况

Fig. 1 Reinforcement details of T and L-shaped columns

与正向裂缝形成 X 形交叉斜裂缝,腹板内侧同时也形成多个 X 形交叉斜裂缝;正向加载至 3Δ 时,腹板混凝土保护层开始发生部分剥落现象;正向加载至 4Δ 时,柱底腹板出现竖向裂缝,混凝土保护层裂缝宽度较大;随着变形的继续增大,柱底腹板混凝土保护层全部剥落,同时正向加载造成翼缘内混凝土也出现了破坏剥落现象。试验结束时,柱底腹板混凝土完全剥落,纵筋压弯,柱底箍筋绑扎处被拉开。L 形柱的破坏情况如图 3 所示。

1.3 滞回曲线

试验测得 T 形和 L 形柱水平荷载-位移滞回曲线如图 4 所示,T 形和 L 形柱骨架曲线如图 5 所示。

图 5 中 A, B, C 分别为正向加载时 T 形和 L 形柱荷载-位移曲线上的屈服点、极限点及破坏点, A', B', C' 分别为反向加载时 T 形和 L 形柱荷载-位移曲线上的屈服点、极限点及破坏点。其中屈服点由骨架曲线根据等面积法确定,破坏点为极限荷载下降到 85% 时所对应的荷载点。

本次试验 T 形和 L 形柱的剪跨比为 2.5 左右,因此量测得到的水平荷载-位移滞回曲线和骨架曲线表现出了明显的不对称性。由 T 形柱破坏特征及滞回曲

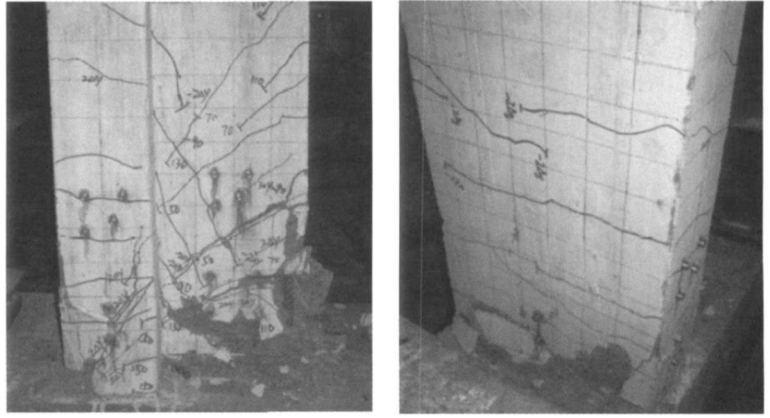


图 2 T 形柱底破坏照片

Fig. 2 Damaged pictures of T-shaped column

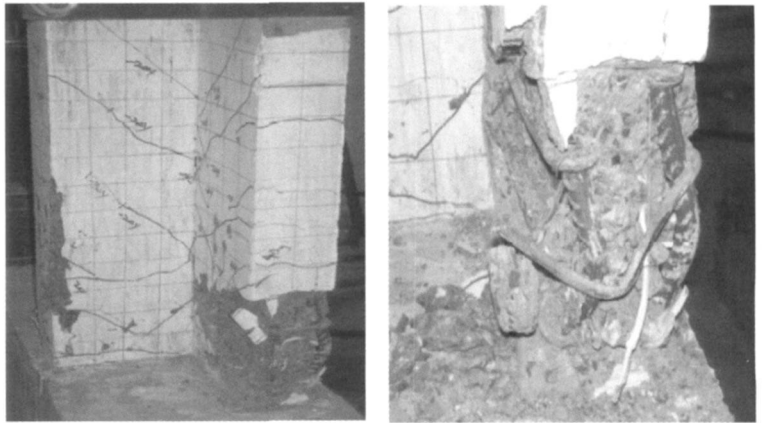


图 3 L 形柱底破坏照片

Fig. 3 Damaged pictures of L-shaped column

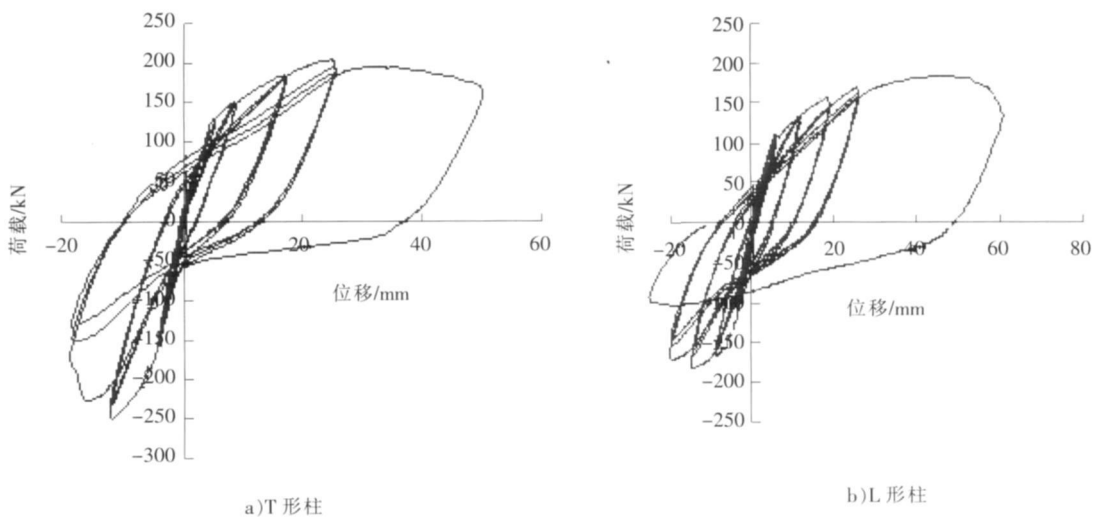


图 4 T 形和 L 形柱滞回曲线

Fig. 4 Hysteretic curves of T and L-shaped column

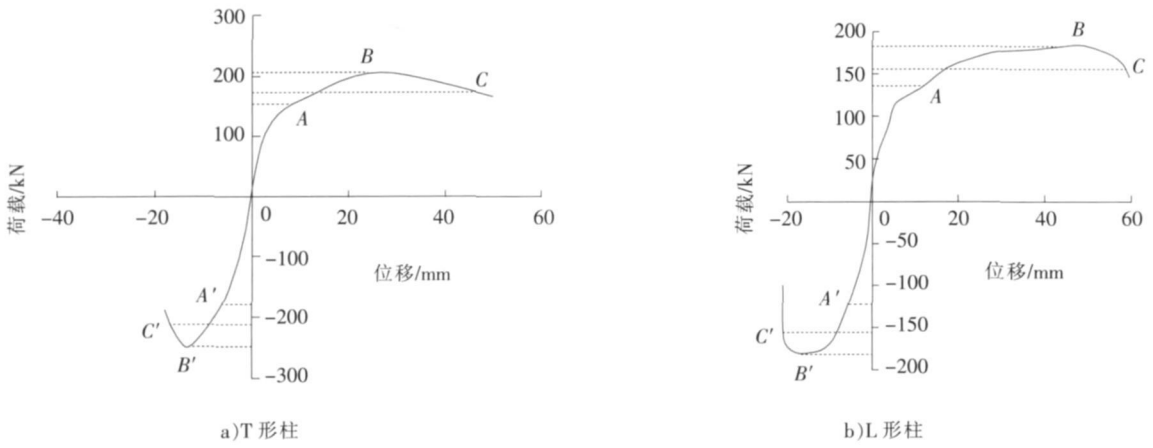


图 5 T 形和 L 形柱骨架曲线

Fig. 5 Skeleton curves of T and L-shaped columns

线可知,开始加载时,正反 2 方向承载能力和变形能力比较相近,滞回曲线不对称性并不显著,而在加载后期,由于柱底腹板受压时混凝土破坏严重,截面曲率增大,水平变形较大,而承载能力增长缓慢,柱底翼缘受压时混凝土破坏程度较轻,截面曲率增长速率缓慢,即截面刚度下降缓慢,因此水平变形较小,承载能力较大。正是由于 T 形柱正反受剪时存在腹板和翼缘分别受压和受拉 2 种状态,从而造成了水平荷载-位移滞回曲线不对称的特性。由此可知, T 形柱滞回曲线不对称的特性是不可避免的,增大剪跨比仅能缓解不对称性,而不能消除不对称性。低剪跨比时 T 形柱滞回曲线和骨架曲线的不对称性表明了正反两个方向承载能力和变形能力的不对称性,即 2 个方向的抗震性能存在显著差异,因此《混凝土异形柱结构技术规程》(JGJ 149-2006)^[15] 中的斜截面受剪承载力计算公式中没有考虑这一因素是不合理的,不能正确反应 T 形柱 2 个方向实际的受剪承载力。L 形柱的滞回曲线和骨架曲线也表现出了不对称现象,但与 T 形柱不同,其主要表现为变形的不对称,正反 2 个方向的极限承载力相差不大。出现这种现象的原因是因为 L 形柱翼缘对构件正反向抗剪作用较小,故构件主要通过腹板承受剪力,与《混凝土异形柱结构技术规程》(JGJ 149-2006) 中的斜截面受剪承载力计算公式规定一致。

本次试验 T 形和 L 形柱 2 个方向承载能力和变形能力如表 1、表 2 所示。

表 1 T 形柱承载能力和变形能力

Tab. 1 Load and deformation of T-shaped column

项目	荷载 / kN				位移 / mm				延性系数
	开裂	屈服	极限	破坏	开裂	屈服	极限	破坏	
正向	46.0	152.6	204.0	173.4	1.01	8.40	24.69	45.93	5.47
反向	91.0	179.5	250.0	212.5	2.35	6.35	12.23	16.99	2.68
均值	68.5	166.1	227.0	193.0	1.68	7.38	18.46	31.46	4.08

表 2 L 形柱承载能力和变形能力

Tab. 2 Load and deformation of L-shaped column

项目	荷载 / kN				位移 / mm				延性系数
	开裂	屈服	极限	破坏	开裂	屈服	极限	破坏	
正向	50.0	136.2	183.0	155.6	1.22	12.16	48.61	58.43	4.81
反向	70.0	122.3	183.0	155.6	2.05	5.30	15.03	20.50	3.87
均值	60.0	129.3	183.0	155.6	1.64	8.73	31.82	39.47	4.34

由表 1 可知, T 形柱剪跨比为 2.5 左右时,反向加载极限荷载约为正向加载极限荷载的 1.23 倍,而反向加载极限位移仅约为正向加载极限位移的 0.5 倍。T 形柱的破坏位移为破坏点对应的位移。反向加载时 T 形

柱达到极限位移后不久就达到了破坏位移,两者之间的差值为 4.76 cm。正向加载时 T 形柱达到极限位移后又经过较大的变形才达到破坏位移,两者的差值为 21.24 cm,而表 1 中的位移延性系数为破坏位移与屈服位移的比值,因此计算得到的 T 形柱正向位移延性系数仅为 5.47,反向位移延性系数约为 2.68,正反向位移延性系数的差值为 2.79。由此可见,剪跨比为 2.5 左右时 T 形柱 2 个方向的延性存在较大差异。

由表 2 可知, L 形柱剪跨比为 2.5 左右时,正反 2 个方向的极限承载力相等,但 2 个方向的变形能力相差较大,正向极限位移约为反向极限位移的 3.23 倍,正向延性系数约为 4.81,反向延性系数约为 3.87, L 形柱正向变形能力大于反向变形能力。

1.4 刚度退化

刚度与承载能力和延性一样也是构件抗震性能的一个重要指标。定义坐标原点与某次循环的荷载峰值(即骨架曲线上的点)连线的斜率为等效刚度,其值由 $K = F/U$ 得到。在位移不断增大的情况下,刚度一环比一环减小,因此,刚度将随着循环周数和位移接近极限而减小,这就是刚度退化。图 6、图 7 为 T 形和 L 形柱正反向刚度退化曲线。

由图 6 可见,低剪跨比时 T 形柱正反向刚度退化曲线也存在显著不对称性,正向加载刚度退化曲线接近线性,反向加载刚度退化曲线

经历了刚度速降、刚度次降和刚度缓降 3 个阶段。对比左右刚度曲线,同一加载周期时,正向加载刚度均大于反向加载刚度,即腹板受拉时, T 形柱刚度下降速率小于腹板受压时的刚度下降速率。

由图 7 可见, L 形柱正反向刚度退化曲线也存在不对称现象,正向加载刚度退化曲线经历了刚度速降、刚度次降和刚度缓降 3 个阶段,而反向加载刚度退化曲线整个加载过程中下降速率平稳,不存在缓降阶段。由于 L 形柱正反向承载力差别不大,但变形能力差异显著,因此 2 个方向的初始刚度差别较大,由于反向刚度退化平稳,中后期同一加载周期时,反向加载刚度均大于正向加载刚度。

2 结 论

1) 试验研究表明,由于特殊的截面形式, T 形柱构件正反向加载时存在腹板和翼缘分别受压或受拉 2 种状态,因此 T 形柱正反 2 个方向的承载能力和变形能力等抗震性能指标存在差异,其荷载-位移曲线具有不对称性,且这种不对称性是不可避免的。当 T 形柱的狭义剪跨比小于 3.0 时,不对称性更为显著,柱底腹板受压时,柱脚混凝土破坏严重,降低了异形柱水平截面刚度和承载力,不利于结构抗震。当 T 形柱的狭义剪跨比大于 3.0 时,不对称性将有所缓解。

2) 狭义剪跨比小于 3.0 时, L 形柱正反 2 个方向的承载能力较接近,但变形能力差异较大, L 形柱腹板受压时,柱脚混凝土破坏严重,降低了水平截面刚度,同样不利于结构抗震。由于 L 形柱没有对称轴,且一般位于结构角部,此处异形柱遭受地震作用时将伴随扭转,因此对 L 形柱的抗扭转作用应予以重视。

3) 现行异形柱规程中未就 T 形柱正反 2 个方向的承载能力和变形能力不对称性问题进行说明,然而不

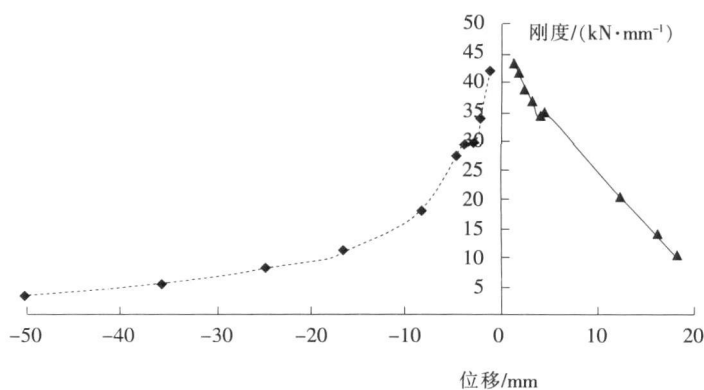


图 6 T 形柱刚度退化曲线

Fig. 6 Rigidity degeneracy curve of T-shaped column

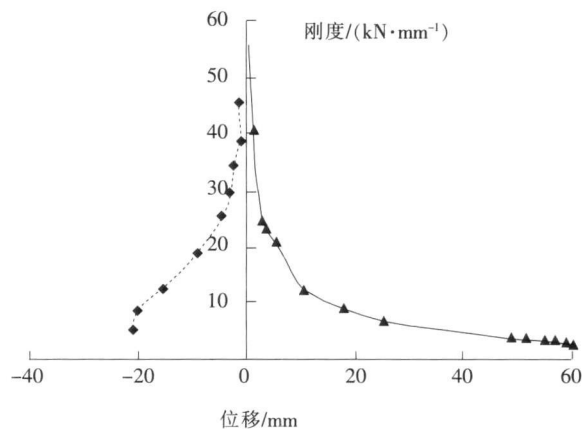


图 7 L 形柱刚度退化曲线

Fig. 7 Rigidity degeneracy curve of L-shaped column

同受力状态下 T 形柱构件正反 2 个方向的承载能力和变形能力存在较大差异, 因此应对这一问题进行深入探讨, 以完善规程中有关异形柱受剪承载力计算的规定。

参考文献:

- [1] THOMAS H C. T-shaped reinforced concrete members under biaxial bending and axial compression[J]. ACI Structural Journal, 1989, 86(4): 460-468.
- [2] YAU C Y, CHAN S L, SO A K W. Biaxial bending design of arbitrarily shaped reinforced concrete column[J]. ACI Structural Journal, 1993, 90(3): 269-278.
- [3] 冯建平, 陈 谦, 卫 园, 等. L 形和 T 形截面柱正截面承载力的研究[J]. 华南理工大学学报(Journal of South China University of Technology), 1995, 23(1): 54-61.
- [4] 肖 芳, 何放龙. L 形、T 形及十字形截面钢筋混凝土异形柱配筋计算[J]. 四川建筑科学研究(Sichuan Building Science), 2002, 28(1): 10-12.
- [5] 赵艳静, 李忠献, 陈云霞. 四级抗震等级时钢筋混凝土异形柱轴压比限值的研究[J]. 建筑结构学报(Journal of Building Structures), 2004, 25(3): 58-62.
- [6] 赵艳静, 陈云霞, 于顺泉. 钢筋混凝土异形截面框架柱轴压比限值的研究[J]. 天津大学学报(Journal of Tianjin University), 2004, 37(7): 600-604.
- [7] 李 杰, 吴建营, 周德源, 等. L 形和 Z 形宽肢异形柱低周反复荷载试验研究[J]. 建筑结构学报(Journal of Building Structures), 2002, 23(1): 9-15.
- [8] 杜 琛, 王铁成, 陈向上. L 形截面宽肢混凝土柱破坏形态研究[J]. 沈阳理工大学学报(Journal of Shenyang Ligong University), 2007, 26(2): 80-83.
- [9] 陈宗平, 薛建阳, 赵鸿铁, 等. 低周反复荷载作用下型钢混凝土异形柱的抗剪承载力分析[J]. 土木工程学报(China Civil Engineering Journal), 2007, 40(7): 30-36.
- [10] 郭 棣, 吴敏哲, 艾 兵. T 形截面柱框架的抗震性能分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版)(Journal of Xi'an University of Architecture and Technology(Natural Science Edition)), 2003, 35(3): 205-207.
- [11] 李晓莉, 郭 棣, 吴敏哲. T 形截面柱的非线性分析[J]. 世界地震工程(World Earthquake Engineering), 2005, 21(3): 122-125.
- [12] 曹万林, 王光远. 不同方向周期反复荷载作用下 T 形柱的性能[J]. 地震工程与工程振动(Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration), 1995, 15(4): 76-84.
- [13] 郭 棣, 吴敏哲, 谢异同. 宽肢 T 形柱的滞回特性及耗能分析[J]. 世界地震工程(World Earthquake Engineering), 2002, 18(2): 146-149.
- [14] 曹万林, 庞国新, 卢立伟, 等. 较小剪跨比带暗柱 T 形柱抗震性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动(Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration), 1999, 19(4): 61-66.
- [15] JGJ 149—2006, 混凝土异形柱结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.

向本期载文的审稿专家致谢

本期《河北科技大学学报》共发表论文 22 篇。这些论文的发表是与有关专家的认真审读、细查资料、推敲分析、中肯评价分不开的。对此, 本编辑部特向这些专家表示敬意, 对他们的辛勤劳动表示感谢。

本期载文的审稿专家名单如下(按姓名的汉语拼音顺序排列):

陈 涛	戴亚平	窦全杰	杜群乐	杜太行	韩 刚
李永刚	吕玉华	史兰香	唐桂华	田 斌	王宝光
王 建	王森林	王卫星	吴艳青	翟学良	张焕祯
张 越	赵冬梅	赵又群			

(本刊编辑部)