

文章编号: 1000-5013(2012)04-0429-06

# 钢筋混凝土异形柱抗扭性能的数值模拟

何叶, 徐玉野, 林燕卿, 罗漪

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 基于有限元软件 ANSYS, 建立压扭作用下钢筋混凝土异形柱抗扭性能的数值分析模型, 并对压扭作用下 9 根异形柱的抗扭性能试验进行数值模拟分析. 通过反复试算, 提出混凝土异形柱压扭性能数值模拟的模型分析参数, 分析轴压比对不同截面形状和尺寸的钢筋混凝土异形柱的开裂扭矩和极限扭矩的影响规律. 研究表明: 数值模型对异形柱的开裂扭矩和极限扭矩预测较准, 但对扭矩-扭转角全过程曲线的预测还有待进一步改进; 不同截面形状和尺寸的混凝土异形柱的开裂扭矩和极限扭矩随着轴压比的增大均近似呈直线增加, 但当轴压比超过 0.6 时, 异形柱的开裂扭矩和极限扭矩反将降低; 随着轴压比的增大, 异形柱从开裂扭矩发展到极限扭矩的过程缩短.

**关键词:** 钢筋混凝土; 异形柱; 抗扭性能; 数值模拟; 轴压比; 截面尺寸

**中图分类号:** TU 375.3

**文献标志码:** A

扭转作为钢筋混凝土异形截面构件的基本受力形式之一, 有关其纯扭性能方面的研究已取得了一定的进展<sup>[1-3]</sup>. 异形截面由于具有连接效应, 其纯扭承载力要比将它们划分成若干个矩形来计算所得到的承载力之和要大. 因此, 将异形截面划分为若干个矩形截面计算的方法是偏于安全的、可行的<sup>[4]</sup>. 异形柱空间结构在地震作用下, 由于结构的不对称性、偶然偏心荷载等因素的影响, 异形柱空间框架中异形柱实际上会处于压、弯、剪、扭的复合受力状态. 现行国家标准 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》给出了矩形柱在压扭作用下抗扭承载力的设计公式<sup>[5]</sup>, 但未给出相应的适用于异形柱的设计公式; 而行业标准 JGJ 149—2006《混凝土异形柱结构技术规程》中未给出任何有关异形柱抗扭承载力的相关设计条文<sup>[6]</sup>. 与矩形柱相比, 异形柱由于多肢的存在, 其剪力中心与截面形心往往不重合, 其扭转效应比矩形柱更为明显, 受力时要靠各肢交点处核心混凝土的协调变形承受荷载, 从而使各柱肢存在相当大的翘曲正应力和剪应力. 这会使异形柱的延性变差, 脆性破坏性质更明显<sup>[7]</sup>. 陆新征等<sup>[8]</sup>利用有限元软件对异形柱框架结构和矩形柱框架结构进行地震作用下的对比分析, 表明异形柱框架的抗扭性能要远低于等惯性矩的矩形柱框架结构. 总之, 随着异形柱结构在工程结构中的应用日渐广泛<sup>[9]</sup>, 开展异形柱在压扭作用下的抗扭性能研究显得十分紧迫和重要. 为此, 本课题组进行了 9 根钢筋混凝土异形柱在压力和扭矩共同作用下抗扭性能试验, 根据试验结果初步分析了轴压比、截面形状和钢筋配置对异形柱抗扭性能的影响规律<sup>[10]</sup>. 在此基础上, 本文利用有限元数值分析模型, 进一步深入分析轴压比对不同截面形状和尺寸的钢筋混凝土异形柱的开裂扭矩和极限扭矩的影响规律.

## 1 有限元模型及其试验验证

### 1.1 单元类型

混凝土采用 ANSYS 单元库中的 SOLID 65 单元, 钢筋单元采用 LINK 8 单元. 在构件扩大头顶面形心处利用质量单元 MASS 21 建立主节点, 与顶面其他节点通过 MPC 184 单元连接. MPC 184 单元

**收稿日期:** 2011-11-10

**通信作者:** 徐玉野(1978-), 男, 副教授, 主要从事混凝土结构的研究. E-mail: yuyexu@hqu.edu.cn.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(50908091); 福建省高校杰出青年科研人才培育计划项目(JA10005); 福建省泉州市技术与开发重点项目(2011Z10); 华侨大学基本科研业务费专项基金资助项目(JB-SJ1011); 福建省教育厅 A 类面上科技项目(JA11003)

的每个节点有 6 个自由度,单元关键字(KEYOPT)取 1,此时单元相当于一个刚性梁,可用来传递力或者力矩,适用于大转角的情况.

1.2 材料性质

混凝土轴心抗压强度标准值和轴心抗拉强度标准值的计算采用 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》<sup>[5]</sup>中的公式,但不考虑对试件混凝土强度的修正系数 0.88.原因是这个系数是考虑结构中混凝土强度和试件混凝土强度之间的差异,实际工程中可能会出现一些强度上的波动,而试验中构件比较精细,能够保证强度.具体计算公式为

$$f_{ck} = \alpha_{c,1} \alpha_{c,2} f_{cu,k}, \tag{1}$$

$$f_{tk} = 0.395 f_{cu,k}^{0.55} (1 - 1.645\delta)^{0.45} \times \alpha_{c,2}. \tag{2}$$

式(1),(2)中: $f_{ck}$ , $f_{tk}$ 和 $f_{cu,k}$ 分别为混凝土的轴压强度标准值、轴拉强度标准值和立方体抗压强度标准值; $\alpha_{c,1}$ , $\alpha_{c,2}$ 和 $\delta$ 分别为棱柱强度与立方体强度比值、脆性折减系数、变异系数,按文献<sup>[5]</sup>取值.

混凝土的泊松比 $\nu$ 取 0.2,开启开裂选项,关闭压碎选项,强化准则采用多线性等向强化模型(MISO)模拟,破坏准则采用 Willam-Warnker5 参数破坏准则.经与试验结果比较并反复试算,发现当混凝土张开裂缝的剪力传递系数 $\beta_i$ 取 0.4,闭合裂缝的剪力传递系数 $\beta_c$ 取 0.95 时,异形柱的开裂扭矩和极限扭矩的数值分析结果和试验结果总体上吻合较好.混凝土的本构关系采用 Hongnestad 表达式<sup>[11]</sup>,即

$$\sigma_c = \sigma_0 \left[ 2 \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right) - \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^2 \right], \quad \epsilon_c \leq \epsilon_0, \tag{3}$$

$$\sigma_c = \sigma_0 \left[ 1 - 0.15 \left( \frac{\epsilon_c - \epsilon_0}{\epsilon_u - \epsilon_0} \right) \right], \quad \epsilon_0 < \epsilon_c \leq \epsilon_u. \tag{4}$$

式(3),(4)中: $\sigma_c$ 为混凝土应力; $\epsilon_c$ 为混凝土应变; $\sigma_0$ 为轴压强度标准值; $\sigma_0 = f_{ck}$ ; $\epsilon_0$ 为混凝土峰值应变; $\epsilon_u$ 为混凝土极限应变.本文数值分析过程中, $\epsilon_0$ 取 0.002 5<sup>[12]</sup>, $\epsilon_u$ 取 0.003 8<sup>[11]</sup>.

钢筋的泊松比 $\nu$ 均取作 0.3,强化准则采用多线性随动强化模型(MKIN)模拟,本构关系采用三折线模型, $\epsilon_{s,h}$ 取 5 $\epsilon_y$ , $\epsilon_{s,u}$ 取 0.02<sup>[13]</sup>.具体的本构关系表达式为

$$\sigma_s = \epsilon_s E_s, \quad \epsilon_s \leq \epsilon_y, \tag{5}$$

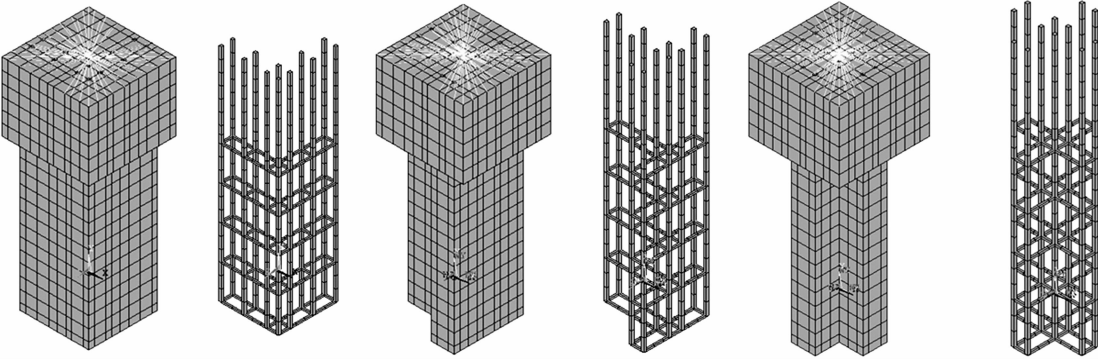
$$\sigma_s = f_y, \quad \epsilon_y < \epsilon_s \leq \epsilon_{s,h}, \tag{6}$$

$$\sigma_s = \left( \frac{f_{s,u} - f_y}{\epsilon_{s,u} - \epsilon_{s,h}} \right) (\epsilon_s - \epsilon_{s,h}) + f_y, \quad \epsilon_{s,h} < \epsilon_s \leq \epsilon_{s,u}. \tag{7}$$

式(5)~(7)中: $\sigma_s$ 为钢筋应力; $E_s$ 为钢筋弹性模量; $\epsilon_s$ 为钢筋应变; $\epsilon_y$ 为弹性阶段对应的最大应变; $\epsilon_{s,h}$ 为屈服平台对应的最大应变; $\epsilon_{s,u}$ 为钢筋极限拉应变; $f_y$ 为钢筋屈服强度; $f_{s,u}$ 为钢筋极限强度.

1.3 实体建模和单元划分

试件的有限元模型如图 1 所示.首先建立钢筋的有限元模型,形成钢筋笼,纵筋一直延伸到扩大头的顶部,再建立混凝土的几何模型.用布尔操作把几个实体粘结成一个整体,将几何实体以钢筋位置切分,保证划分过程中混凝土与钢筋共节点,用 NUMMRG 和 NUMCMP 命令将相同坐标的节点合并,不



(a) L 形柱

(b) T 形柱

(c) 十字形柱

图 1 试件的有限元模型

Fig. 1 Finite element model of the specimens

考虑钢筋与混凝土之间的黏结和滑移. 构件扩大头顶面的形心处利用 MASS 21 单元建立主节点, 利用 MPC 184 单元将扩大头顶面的其他节点与主节点连接, 形成刚性面, 在主节点上施加扭矩角. 单元网格尺寸大约在 50 mm 左右.

1.4 边界条件和加载方式

将构件底面所有节点的 3 个平动自由度和 3 个转动自由度全部约束作为固定端, 采用两个荷载步施加荷载.

1) 第 1 个荷载步施加轴力, 并保持定值. 加载方式采用对扩大头顶面施加法向面荷载, 保证所加轴力始终垂直于加载面, 并可防止应力奇异导致的构件过早开裂.

2) 第 2 个荷载步在扩大头形心处的主节点施加扭转角, 形成扭矩. 有限元求解过程中为加速收敛, 打开线性搜索和预测器. 轴力加载过程中采用 L2 范数控制收敛, 扭转角加载过程中采用无限范数控制收敛, 平衡迭代最大次数取 30 次.

1.5 计算结果及分析

ANSYS 计算的开裂扭矩和极限扭矩与试验结果的对比情况, 如表 1 所示. 表 1 中:  $n$  为轴压比,  $n = N/(f_{ck}A)$ ,  $N$  为施加的轴压力,  $A$  为柱横截面面积;  $T_{cr,c}$ ,  $T_{cr,s}$  分别为开裂扭矩的试验值和模拟值;  $T_{u,r}$ ,  $T_{u,s}$  分别为极限扭矩的试验值和模拟值;  $\eta_{cr}$ ,  $\eta_u$  分别为开裂扭矩和极限扭矩的误差率.

表 1 开裂扭矩和极限扭矩的计算结果与试验结果对比

Tab. 1 Comparison between simulation results and experimental results of the cracking torque and ultimate torque

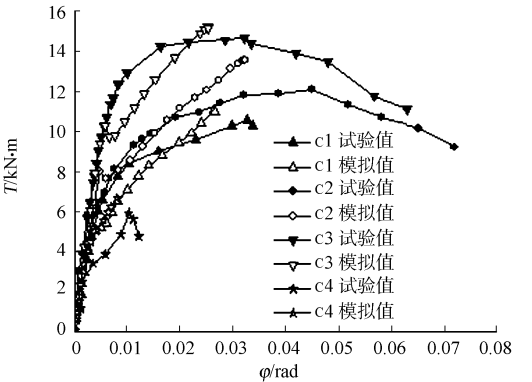
构件编号	截面形状	$n$	$T_{cr,c}/\text{kN}\cdot\text{m}$	$T_{cr,s}/\text{kN}\cdot\text{m}$	$\eta_{cr}/\%$	$T_{u,r}/\text{kN}\cdot\text{m}$	$T_{u,s}/\text{kN}\cdot\text{m}$	$\eta_u/\%$
C1	L 形	0.063	6.58	5.21	20.85	10.58	11.02	4.14
C2	L 形	0.189	8.14	8.01	1.62	12.08	13.53	12.04
C3	L 形	0.314	11.45	10.25	10.45	14.67	15.20	3.62
C4	L 形	0.189	5.78	4.43	23.41	5.98	6.67	11.53
C5	T 形	0.189	6.49	7.79	20.01	12.53	13.99	11.68
C6	T 形	0.314	11.10	10.28	7.35	14.54	15.67	7.80
C7	T 形	0.189	5.46	4.47	18.05	6.08	6.54	7.60
C8	十字形	0.189	6.36	5.22	17.93	9.39	9.19	2.59
C9	十字形	0.189	5.04	4.56	9.57	6.08	6.35	4.45

ANSYS 计算的扭矩-扭转角 ( $T-\varphi$ ) 曲线与试验结果的对比情况, 如图 2 所示. 表 1 和图 2 中试件的编号与文献[10]中的编号相对应.

由表 1 可知: 极限扭矩的模拟值与试验值的误差在 12.4% 以内. 开裂扭矩的模拟值与试验值对比, 除个别构件的误差略微超过 20% 外, 误差基本在 20% 以内. 开裂扭矩的误差相对较大, 可能是由于试验过程中为确保试验人员的安全, 当某一级荷载加载完成后才开始人工观测裂缝, 而裂缝可能在该级荷载的加载过程中出现.

由图 2 可知: 数值模拟的扭矩-扭转角曲线与试验曲线的上升段比较吻合, 但构件在达到极限扭矩时, 数值模拟的扭转角都比试验的偏小. 究其原因可能是由于试验过程采用钢筋混凝土盖梁施加扭矩, 盖梁安装在构件的扩大头上. 随着扭矩的不断增大, 盖梁与构件扩大头之间贴得更紧, 导致产生虚转角. 另外, 加载过程中盖梁自身也不可避免地存在变形, 所以试验达到极限荷载时所测得的扭转角会比数值模拟大.

结合表 1 和图 2 可以认为, 有限元软件 ANSYS 较好地模拟了压扭作用下钢筋混凝土异形柱的开裂扭矩、极限扭矩, 以及扭矩-扭转角曲线的上升段, 但其对于扭矩-扭转角的全过程曲线(特别是下降段)的模拟有待进一步改进.



(a) L 形柱

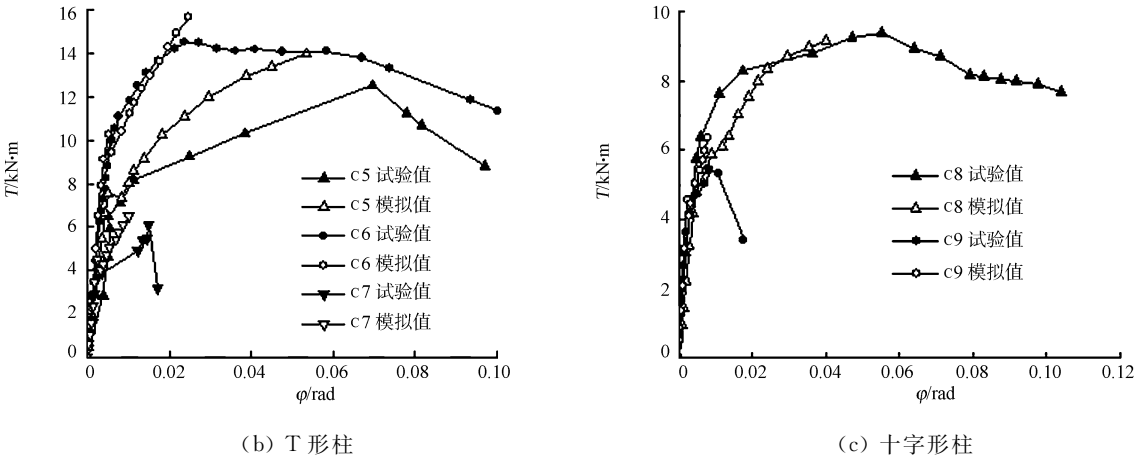


图 2 扭矩-扭转角曲线的数值模拟结果与试验结果对比  
Fig. 2 Comparison between numerical simulation results and experimental results of the torque-torsion angle curves

2 影响因素分析

为研究轴压比对不同截面形状和尺寸的等肢异形柱的开裂扭矩和极限扭矩的影响趋势,取图 3 所示的异形柱进行数值模拟计算.图 3 中:截面尺寸大小用  $h \times b$  表示, $h$  为肢高, $b$  为肢厚,柱高取 2 000 mm.具体取 3 种截面尺寸的异形柱,其尺寸分别为 500 mm  $\times$  200 mm,500 mm  $\times$  250 mm,600 mm  $\times$  200 mm;混凝土强度等级取 C30;保护层厚度取 30 mm;纵筋采用 HRB335 级钢筋,直径 18 mm,共配置 12 根;箍筋采用 HPB235 级钢筋,直径 8 mm,间距 150 mm.纵筋和箍筋的屈服强度分别取 335 MPa 和 235 MPa,极限强度分别取 510 MPa 和 370 MPa.

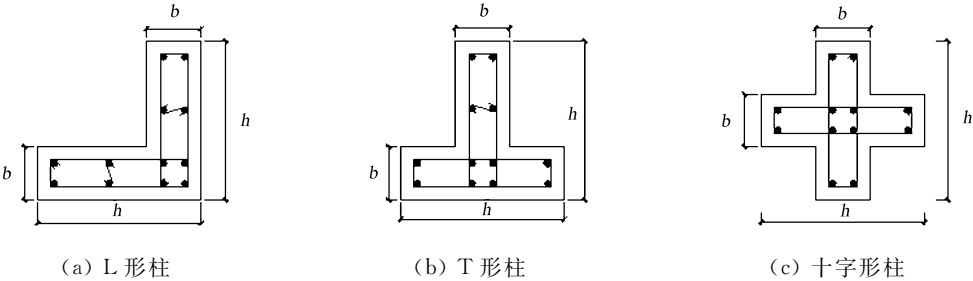


图 3 截面参数和纵筋布置(单位:mm)  
Fig. 3 Parameters of cross section and arrangement of longitudinal bars (unit:mm)

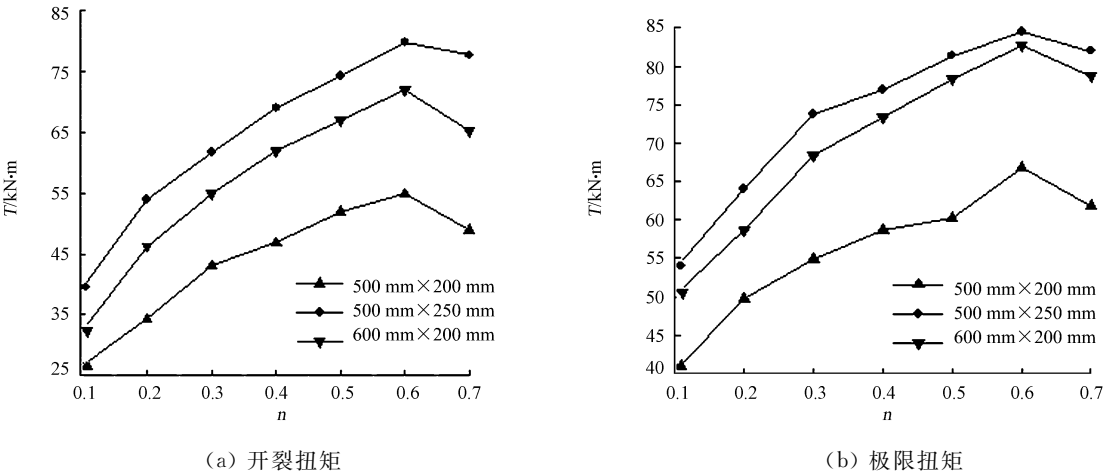


图 4 L 形柱的开裂扭矩和极限扭矩随轴压比的变化情况  
Fig. 4 Variation of cracking torque and ultimate torque of L-shaped columns with axial compressive ratio

不同截面尺寸的  $L$  形柱、 $T$  形柱和十字形柱的开裂扭矩  $T_{cr}$  和极限扭矩  $T_u$  随轴压比  $n$  的变化情况,如图 4~6 所示. 从图 4~6 可以得到如下两点结果.

1) 不同截面尺寸异形柱的开裂扭矩和极限扭矩总体上均随轴压比的增加而近似增大,但当轴压比大于 0.6 时,异形柱的开裂扭矩和极限扭矩均开始下降. 这表明轴压比对异形柱的开裂扭矩和极限扭矩的提高是有限的,当轴压比超过某一限值时,轴压比的增大将降低异形柱的抗扭性能.

2) 随着轴压比的增大,异形柱从开裂扭矩发展到极限扭矩的过程缩短. 这可能是由于轴压比较高的异形柱的开裂荷载比较大,开裂时构件内受压区已处于一个较高的应力状态,从而使该区域更容易达到混凝土受压的极限状态.

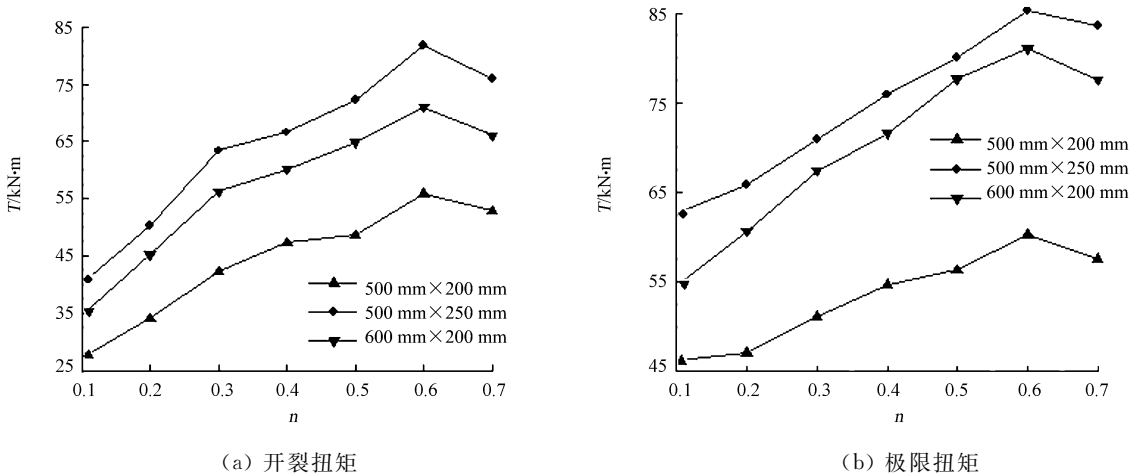


图 5 T 形柱的开裂扭矩和极限扭矩随轴压比的变化情况

Fig. 5 Variation of cracking torque and ultimate torque of T-shaped columns with axial compressive ratio

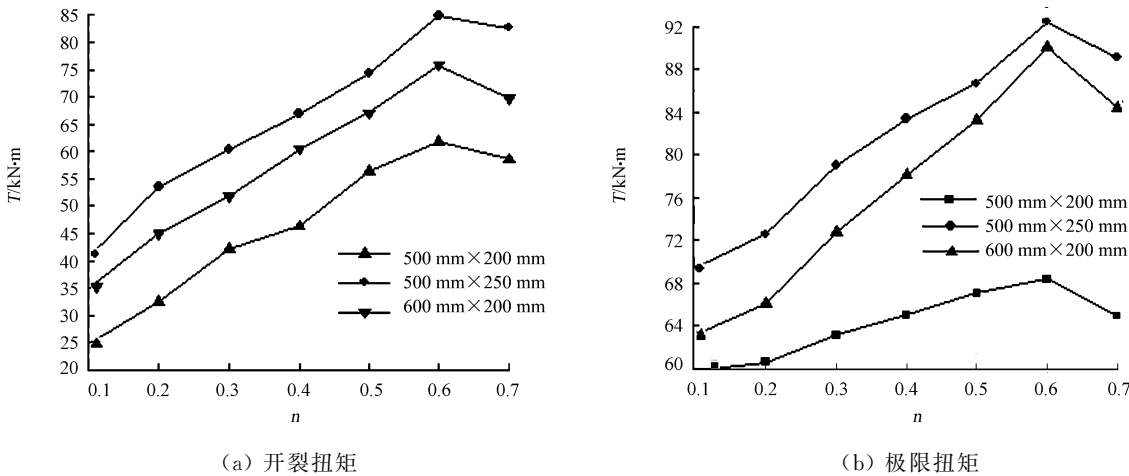


图 6 十字形柱的开裂扭矩和极限扭矩随轴压比的变化情况

Fig. 6 Variation of cracking torque and ultimate torque of cross-shaped columns with axial compressive ratio

### 3 结论

基于有限元软件 ANSYS,建立了压扭作用下异形柱抗扭性能的数值分析模型,并利用该模型对 9 根压扭作用下的混凝土异形柱试件进行数值分析,验证了所建立的有限元模型. 同时,利用该数值模型分析了轴压比对不同截面形状和尺寸的异形柱的开裂扭矩和极限扭矩的影响规律. 通过研究,可以得到如下 3 个主要结论.

1) ANSYS 能较好地模拟压扭作用下的混凝土异形柱的开裂扭矩、极限扭矩和扭矩-扭转角曲线的上升段,但对扭矩-扭转角全过程曲线(特别是下降段)的模拟还有待进一步研究.

2) 轴压比对异形柱抗扭承载力的有利影响是有限的. 当轴压比不大时,随着轴压比的增大,不同截面形状和尺寸的钢筋混凝土异形柱的开裂扭矩和极限扭矩均近似呈线性增加;而当轴压比大于 0.6 时,

异形柱的开裂扭矩和极限扭矩随着轴压比的增大而减小.

3) 随着轴压比的增大,异形柱从开裂扭矩发展到极限扭矩的过程缩短.

参考文献:

[1] 苏幼坡,康谷贻. 钢筋砼 T 形纯扭构件开裂后工作性能全过程分析[J]. 天津大学学报,1989,22(3):58-66.

[2] 汪夏明,黄蒲三,陆春阳. 钢筋混凝土 L 形截面构件受扭承载力研究[J]. 广西大学学报:自然科学版,1994,19(2):149-157.

[3] 王新堂,章钢. T 形截面 RC 纯扭构件极限强度[J]. 青岛建筑工程学院学报,1996,17(1):10-18.

[4] 汪夏明,黄蒲三,陆春阳. 钢筋混凝土 L 形与 T 形截面抗扭计算探讨[J]. 广西大学学报:自然科学版,1996,21(1):70-73.

[5] 中华人民共和国建设部. GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.

[6] 中华人民共和国建设部. 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.

[7] 孙鹏程,吴祖安,毕佳. 水平地震力作用下钢筋混凝土异形柱框架结构设计[J]. 解放军理工大学学报:自然科学版,2008,9(3):293-297.

[8] 徐玉野,王全凤,邱政和. 典型受火方式下等肢 T 形柱的耐火性能[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2010,31(2):218-223.

[9] 陆新征,江见鲸. 利用斜支撑提高异型柱框架结构抗扭性能的研究[J]. 工业建筑,2002,32(6):39-41.

[10] 邱政和. 压力和扭矩共同作用下钢筋混凝土异形柱的抗扭性能研究[D]. 泉州:华侨大学,2011.

[11] 江见鲸,陆新征,叶列平. 混凝土结构有限元分析[M]. 北京:清华大学出版社,2005.

[12] 程文瀾,王铁成,颜德姮,等. 混凝土结构[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2005.

[13] 王妙芳,郭子雄. 型钢混凝土柱的 ANSYS 数值模拟技术[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2009,30(2):195-199.

Numerical Simulation of the Torsional Behavior for  
Reinforced Concrete Specially-Shaped Columns

HE Ye, XU Yu-ye, LIN Yan-qing, LUO Yi

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** A numerical model for the torsional behavior of reinforced concrete columns with special-shaped cross sections under the actions of compression and torque was established by ANSYS. Some key finite element model parameters for the torsional behavior analysis of these specially-shaped columns were suggested through repeated trial numerical analysis of the tests of nine specially-shaped columns. The influence of axial compressive ratio on the cracking torque and ultimate torque of special-shaped columns with different sectional shapes and dimensions was analyzed. The results show that: the cracking torsion and ultimate torsion of specially-shaped columns is well predicted by finite element model, however the prediction of the full process curve of torque-torsion angle needs further improvement. The cracking torque and ultimate torque of specially-shaped columns increase approximately linearly with the increasing of 0~0.6 axial compressive ratio; for axial compressive ratio>0.6, the cracking torque and ultimate torque decrease. The developing process from the cracking torque to ultimate torque of the specially-shaped columns is shortened with the increasing of the axial compressive ratio.

**Keywords:** reinforced concrete; specially-shaped column; torsional behavior; numerical simulation; axial compressive ratio; sectional dimension

(责任编辑: 钱筠      英文审校: 方德平)