

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2017.04.001

# T 形配钢型钢混凝土偏压构件力学性能研究

郑永乾<sup>1,2</sup>, 赖鹏松<sup>1</sup>, 郑莲琼<sup>1</sup>

(1.福建省土木工程新技术与信息化重点实验室, 福建 福州 350118; 2.福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350116)

**摘要:**建立了 T 形配钢型钢混凝土偏压构件力学性能分析的有限元模型, 计算结果得到以往实验结果的验证。在此基础上, 分析了不同阶段材料应力状态和各参数对偏压构件力学性能的影响。结果表明: T 形配钢型钢混凝土构件在不同加载角下的性能有所不同, 加载角为 180° 时极限承载力大于其他角度情况; 混凝土抗压强度、型钢含钢率、配筋率、荷载偏心率、长细比对构件荷载-变形曲线的影响较大, 随着混凝土强度、型钢含钢率、配筋率的增加, 极限承载力和刚度增加; 随着荷载偏心率的增加, 极限承载力和刚度下降; 随着构件长细比的增加, 构件承载力总体呈现线性下降趋势, 刚度下降明显。

**关键词:** T 形配钢; 型钢混凝土; 偏压构件; 有限元

中图分类号: TU398.9

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2017)04-0307-06

## Behaviour of T-shaped steel reinforced concrete eccentric loaded columns

Zheng Yongqian<sup>1,2</sup>, Lai Pengsong<sup>1</sup>, Zheng Lianqiong<sup>1</sup>

(1. Fujian Provincial Key Laboratory of Advanced Technology and Informationization in Civil Engineering, Fuzhou 350118, China;  
2. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

**Abstract:** Finite element models for analysing the behaviour of T-shaped steel reinforced concrete eccentric loaded columns were established. The calculated results of the columns were validated by the previous experimental results. Furthermore, the material stress status at different stages and the effect of the relevant parameters on the mechanical behaviours of the columns were analysed. The results indicate that the T-shape steel reinforced concrete columns exhibit different performances at different load angles. The ultimate load bearing capacity at a load angle of 180° is higher than that of other load angles. The parameters such as concrete compressive strength, section steel ratio, steel reinforcement ratio, load eccentricity ratio and length to slenderness ratio exert significant influences on the load-deformation curves of the columns. With the increase of the concrete strength, the section steel ratio or the steel reinforcement ratio, the ultimate load bearing capacity and the stiffness increase. With the increase of the load eccentricity, the ultimate load bearing capacity and the stiffness decrease. With the increase of the length to slenderness ratio, the load bearing capacity has the tendency of linear decreasing in general with the stiffness dropping obviously.

**Keywords:** T-shaped steel; steel reinforced concrete; eccentric loaded column; finite element

型钢混凝土柱具有良好的受力性能, 在工程中的应用非常广泛。当型钢混凝土用于边柱时, 可采用 T 形配钢以便于节点的连接。以往对型钢混凝土力学性能的研究主要集中在配置工字型

钢和十字型钢的构件,取得了不少研究成果<sup>[1-2]</sup>,但对 T 形配钢型钢混凝土构件的研究尚不够系统。由于 T 型钢只是单轴对称,其受力与其他对称配钢型钢混凝土不同,因此研究 T 形配钢型钢混凝土构件的力学性能非常重要。

Nishimura 等<sup>[3]</sup>进行了 6 个 T 形配钢型钢混凝土柱的滞回性能试验,试验主要参数为轴压比和加载角,结果表明,该类构件具有较大的能量耗散能力,加载角对正向和反向(正向为推力,反向为拉力)反复加载的抗弯承载力影响显著。王彦斌<sup>[4]</sup>进行了 12 个非对称配钢型钢混凝土柱在地震作用下的滞回性能试验,内配型钢截面形式为 T 型和 L 型,最后建立了构件恢复力模型。赵程程<sup>[5]</sup>进行了 24 个非对称配钢的型钢混凝土柱滞回性能试验,主要参数为配钢形式、配箍形式、配箍率、轴压比、剪跨比,给出了构件轴压比限值的建议值。曾磊等<sup>[6]</sup>、王秋维和史庆轩<sup>[7]</sup>提出了 T 形配钢型钢混凝土柱的正截面承载力计算方法。曾磊等<sup>[8]</sup>进行了 12 个 T 形配钢型钢混凝土柱的水平低周往复荷载试验,分别给出了 T 形配钢型钢混凝土柱在剪切斜压破坏和剪切粘结破坏的受剪承载力的计算方法。曾磊等<sup>[9]</sup>进行了 24 根非对称配钢型钢混凝土柱在往复荷载下的试验,内配型钢截面形式为 T 型和 L 型,最后建立了三线型刚度退化模型。

可见,对 T 形配钢型钢混凝土柱在偏压作用下的性能研究尚少见报道,尤其在双向受力下的偏压性能研究更是缺乏。为此,本文采用 ABAQUS 软件建立了分析 T 形配钢型钢混凝土压弯构件力学性能的有限元模型,并将计算结果与以往相关试验结果对比,验证有限元模型的可靠性。在此基础上,分析了偏压作用下不同阶段混凝土应力状态,并进行了各重要参数对荷载-变形全过程曲线的影响分析,参数主要包括混凝土强度、型钢屈服强度、含钢率、钢筋屈服强度、配筋率、加载角、荷载偏心率、长细比,从而为进一步提出科学合理的设计方法创造条件。

1 有限元建模

采用 ABAQUS 有限元软件进行分析,柱截面如图 1 所示。由于柱高方向的对称性,取柱高一半模型,如图 2 所示。为了更清楚看到型钢和纵筋、箍筋的模型,去除部分混凝土,构件端部设置

刚性端板。

T 型钢、纵筋和箍筋采用 ABAQUS 提供的等向弹塑性模型,应力-应变关系参见韩林海<sup>[10]</sup>提供的表达式。混凝土采用塑性损伤模型,受压应力-应变关系采用 Attard 和 Setunge<sup>[11]</sup>提供的表达式。型钢采用壳单元 S4R 模拟,纵筋和箍筋采用三维杆单元 T3D2 模拟,混凝土、刚性端板采用三维实体单元 C3D8R 模拟。型钢端部与刚性端板采用 shell-to-solid coupling 连接,混凝土与刚性端板采用 Tie 连接,T 型钢、纵筋和箍筋全部嵌入到混凝土中。刚性端板加载线处约束 XY 方向位移,并采用位移加载模式,施加 Z 向位移。

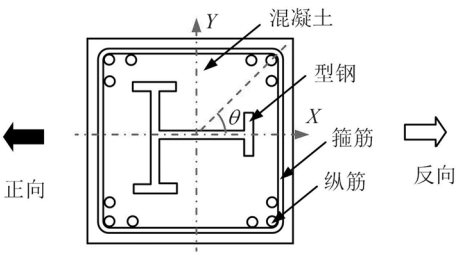


图 1 T 形配钢型钢混凝土截面

Fig.1 T-shaped steel reinforced concrete section

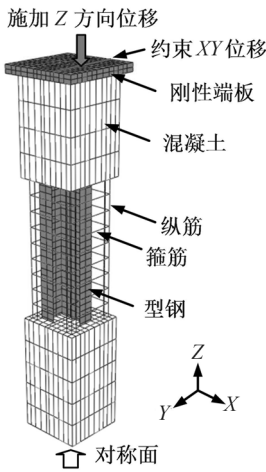


图 2 有限元模型

Fig.2 Finite element model

2 模型验证

由于 T 型配钢型钢混凝土偏压构件试验研究较少,为了验证模型准确性,本文将配工字型钢的型钢混凝土偏压构件试验结果、T 形配钢型钢混凝土的滞回骨架线试验结果与有限元模拟结果进行比较。

叶列平<sup>[12]</sup>报道了 16 个配工字型钢 I10 的型钢混凝土偏压柱试验结果,其中,截面边长  $B =$

160 mm, 型钢屈服强度  $f_y = 312.5$  MPa, 纵向受力钢筋 4 根直径 9 mm, 屈服强度  $f_{yb} = 300.2$  MPa, 混凝土立方体强度  $f_{cu}$  为 34.3~53.57 MPa, 试验考察

的主要参数为长度  $L$ /边长  $B$  为 9.375~18.75, 荷载偏心率  $e/r$  为 0.094~2.0 (其中  $r=B/2$ ), 图 3 给出部分偏压构件计算结果与实验结果对比情况。

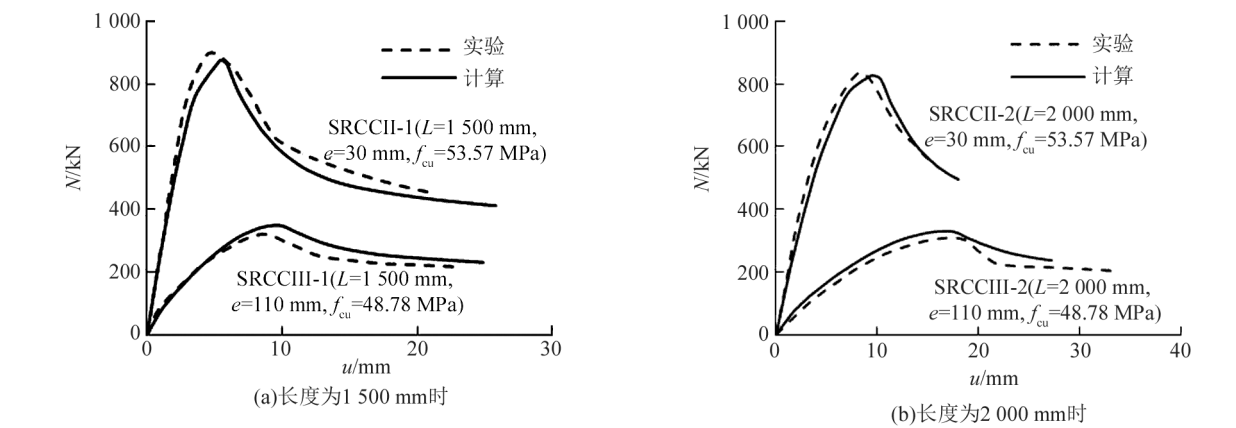


图 3 配工字钢的型钢混凝土构件计算与试验结果对比

Fig.3 Comparison between the calculation results and the experimental results of I-shaped steel reinforced concrete member

滞回骨架曲线往往与单调加载时的荷载-变形曲线一致, 本文也对 Nishimura 等<sup>[3]</sup> 进行的 T 形配钢型钢混凝土构件进行计算, 其不同加载角度  $\theta(0^\circ, 45^\circ$  和  $90^\circ)$  时的弯矩  $M$ -转角  $R$  骨架线

与有限元单调计算结果如图 4 所示。其中, 柱截面为 250 mm×250 mm, 图 4(a)~(c) 所示构件的轴力为压力, 荷载比  $n_c=0.4$ , 图 4(d)~(f) 所示构件的轴力为拉力, 荷载比  $n_t=0.15$ 。

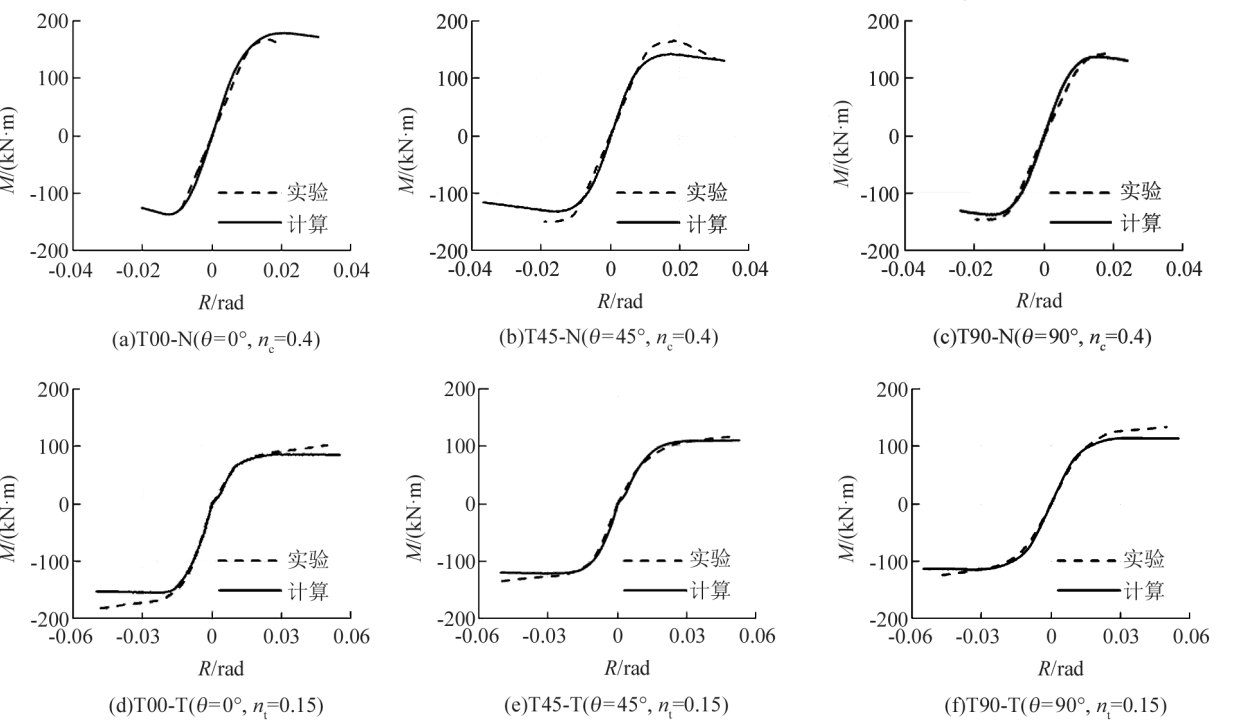


图 4 T 形配钢型钢混凝土的滞回骨架线与计算结果比较

Fig.4 Comparison between hysteresis skeleton curves and the experimental results of T-shaped steel reinforced concrete member

### 3 应力分析

本文选取型钢混凝土柱截面: 截面边长  $B =$

800 mm, 内部 T 形配钢由工字钢 I-500×200×20×16 和型钢 T-400×200×20×16 组合而成; 配置 12 根直径 28 mm 的纵向受力钢筋, 箍筋直径 16 mm,

间距 200 mm。型钢表面至混凝土表面的距离为 150 mm,纵向受力钢筋中心至截面外表面的距离为 70 mm,角部相邻纵向钢筋中心间距为 80 mm。型钢屈服强度  $f_y = 345 \text{ MPa}$ , 钢筋屈服强度  $f_{yb} = 400 \text{ MPa}$ , 混凝土立方体抗压强度  $f_{cu} = 50 \text{ MPa}$ , 柱高  $L = 9\,238 \text{ mm}$ , 即长细比  $\lambda = 40$ , 偏心距  $e = 200 \text{ mm}$ , 其中, 图 1 X 轴正向的荷载偏心距为正值, 反之为负值。

图 5 所示为荷载  $N$ -跨中挠度  $u$  关系曲线, 为考察混凝土应力, 在曲线上取特征点 A、B、C, 其中 A 为钢材屈服强度达到比例极限时刻; B 为极

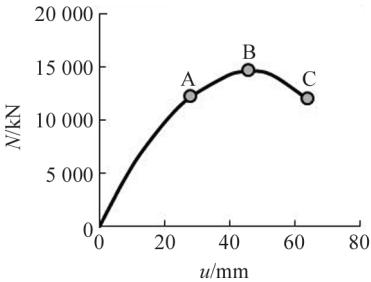


Fig.5 Load-mid-span deflection relationship

限承载力对应点; C 为荷载下降到 82% 极限承载力对应点。

图 6 所示为不同时刻跨中截面混凝土的纵向应力云图, 为便于分析, 图中同时给出型钢位置, 其中混凝土圆柱体强度  $f'_c = 41 \text{ MPa}$ 。可见, 在 A 点时刻, 截面混凝土纵向应力基本呈现带状分布, 最大压应力出现在偏压一侧混凝土最外边缘, 数值为 37 MPa, 截面出现明显的受拉区。随着跨中挠度增加, 混凝土截面受压区面积减少, 受拉区面积增加, 应力出现不规则分布, 右侧边缘应力持续增加, 逐渐达到混凝土单轴受压峰值应力, 左侧边缘的混凝土拉应力进入软化段, 拉应力下降, 型钢附近的拉应力增加, 在 B 点时刻最大压应力和最大拉应力分别为 42.8 MPa 和 3.2 MPa, 此时右侧型钢应力接近屈服。过了 B 点后, 受压区域右侧边缘混凝土塑性发展明显, 压应力不断下降, 右侧型钢附近混凝土压应力不断增加并承担荷载, 混凝土压应力最大位置向左侧方向移动, 由于型钢内部混凝土受到一定的约束作用, 最大压应力在 C 点时达到 49.1 MPa, 中截面右侧大部分型钢已屈服, 在整个受力过程中左侧型钢腹板均未屈服。

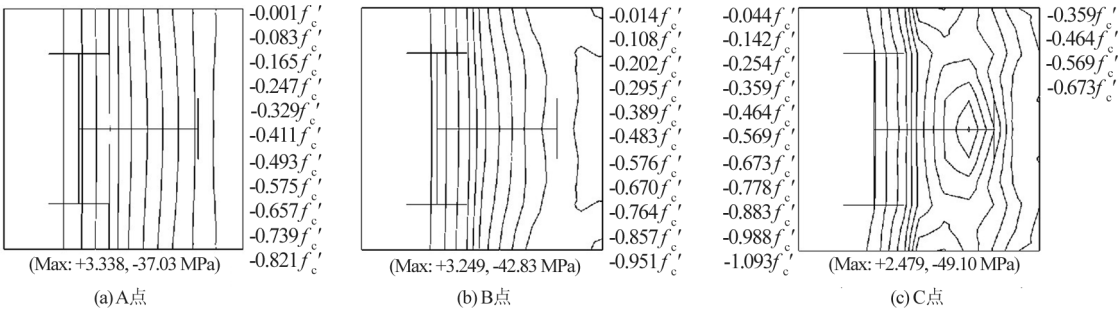


图 6 不同时刻混凝土纵向应力

Fig.6 The concrete longitudinal stress at different times

4 参数分析

基于以上模型, 分别研究了混凝土抗压强度、型钢屈服强度、型钢含钢率、钢筋屈服强度、配筋率、加载角、荷载偏心率、长细比对荷载-变形关系曲线的影响, 如图 7 所示。

4.1 混凝土抗压强度  $f_{cu}$

混凝土抗压强度对构件承载力和刚度的影响显著, 如图 7(a) 所示。随着混凝土强度的增加, 极限承载力明显增加, 混凝土立方体抗压强度为 50 MPa 和 70 MPa 的极限承载力分别比 30 MPa 构

件承载力提高了 35.1% 和 74.7%, 而且随着混凝土抗压强度的增加, 构件刚度也提高, 但由于混凝土塑性性能下降, 因而构件延性变差。

4.2 型钢屈服强度  $f_y$

随着型钢屈服强度的提高, 型钢能够承受更大的荷载, 构件极限承载力提高, 但由于在达到峰值荷载的时候, 型钢仅有右侧部分区域接近屈服强度, 因而提高幅度不大, 型钢屈服强度为 420 MPa 时的构件极限承载力仅比型钢屈服强度为 235 MPa 时的构件承载力提高 4%, 如图 7(b) 所示。由于不同屈服强度型钢的弹性模量相同,



因而不影响构件刚度。

4.3 型钢含钢率  $\alpha$

型钢含钢率越大,型钢的体积就越大,在荷载作用下有更多的钢材发挥作用,构件承载力和刚度提高较明显,总体呈现线性增长的趋势,同时,极限承载力对应的跨中挠度有所增加,如图 7(c) 所示,含钢率为 0.12 的极限承载力和刚度分别比含钢率为 0.08 的构件提高 14.6% 和 7.5%。

4.4 钢筋屈服强度  $f_{yb}$

和型钢屈服强度影响规律一致,钢筋屈服强度对构件的刚度没有影响,对极限承载力的影响不大,如图 7(d) 所示。

4.5 配筋率  $\rho$

配筋率对构件的承载力影响较大,随着配筋率的增加,受力过程中钢筋能够承受更大荷载,其承载力和刚度均增加,如图 7(e) 所示。配筋率从 0.026 到 0.0462 构件刚度增加 17%,承载力增加 20%。

4.6 加载角  $\theta$

图 7(f) 为加载角对构件荷载-变形曲线的影响情况,加载角  $\theta$  为加载点至中心点连线与  $X$  轴正方向的夹角(如图 1)。可见,当加载角为  $45^\circ$  和  $135^\circ$  时,构件极限承载力均有所减小,当加载角为  $90^\circ$  时,偏心一侧的左侧型钢上翼缘和腹板发挥作用,使得极限承载力有所提高,在加载角为  $180^\circ$  时,竖向荷载作用靠近左侧型钢,左侧型钢

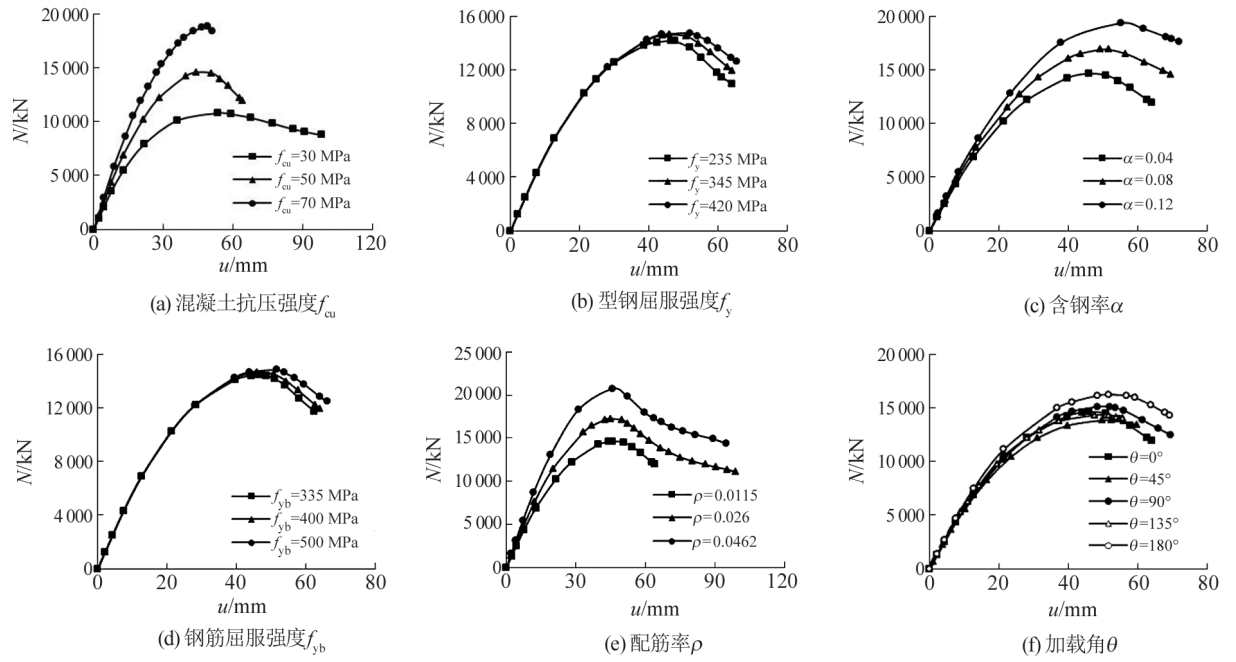
体积较大,有更多钢材发挥作用并承担荷载,极限承载力最大,比加载角为  $0^\circ$  构件承载力提高 11%。从构件刚度上看,加载角的总体影响很小。

4.7 荷载偏心率  $e/r$

荷载偏心率  $e/r$  ( $r=B/2$ ) 对构件刚度和承载力的影响十分显著,如图 7(g) 所示,正值为  $X$  轴正向偏心,负值为  $X$  轴反向偏心。随着荷载偏心率的增加,构件在变形过程中的二阶效应越明显,刚度和极限承载力下降,极限承载力在偏心率  $\leq 0.5$  时下降迅速,而后下降速率有所减小,例如荷载偏心率为 0.25、0.5、0.75、1 的极限承载力分别为荷载偏心率 0 时承载力的 62.7%、43.4%、32.6% 和 26.1%,极限荷载对应的跨中挠度也不断增加;当荷载偏心率数值相同时,负值实际上为加载角为  $180^\circ$  的情况,荷载作用一侧更多型钢发挥作用,总体上极限承载力比正向偏心的高,在  $e/r$  为 1 和 -1 情况下的极限承载力非常接近。

4.8 长细比  $\lambda$

随着构件长细比的增加,构件在荷载作用下更容易发生变形,有更多材料单元快速进入塑性状态,构件承载力下降,极限荷载对应的跨中挠度明显增加,例如,长细比每增加 10,构件极限承载力大致下降 7%,总体呈现线性下降规律,而刚度下降幅度比承载力下降幅度大得多,长细比为 40~60 的构件刚度为长细比 30 构件的 56.3%~25.1%,如图 7(h) 所示。



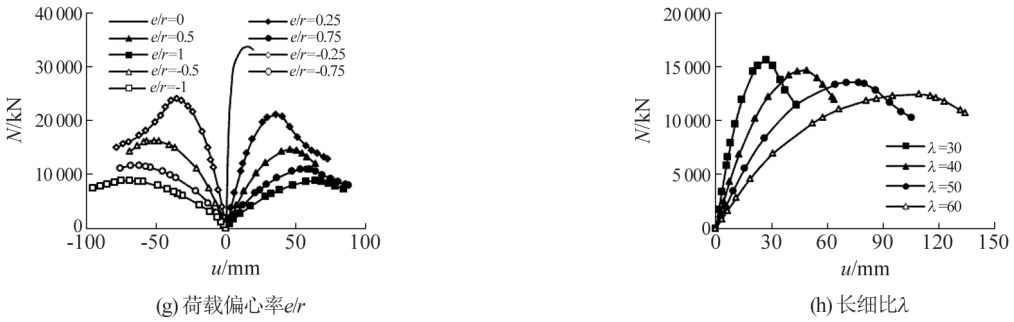


图 7 各参数对荷载-变形关系曲线的影响  
Fig.7 The influence of parameters on load-deformation relation curve

5 结论

- 1) 建立了 T 形配钢型钢混凝土构件在压弯情况下力学性能的有限元模型,通过对比相关试验结果,验证了有限元模型的可靠性,在此基础上分析了受力过程中混凝土的应力状态。
- 2) 由于 T 形配钢截面仅为单轴对称,加载角对构件极限承载力有一定影响,在工程常用参数范围内,当加载角为  $180^\circ$  时极限承载力大于其他角度情况。

- 3) 随着型钢屈服强度或钢筋屈服强度的提高,构件极限承载力提高,但提高幅度不大,基本不影响构件刚度。
- 4) 混凝土抗压强度、型钢含钢率、配筋率、荷载偏心率、长细比对构件荷载-变形曲线的影响较大,随着混凝土强度、型钢含钢率、配筋率的增加,极限承载力和刚度增加;随着荷载偏心率的增加,极限承载力和刚度下降。随着构件长细比的增加,构件承载力总体呈现线性下降趋势,刚度下降明显。

参考文献:

[1] Chen S W, Wu P. Analytical model for predicting axial compressive behavior of steel reinforced concrete column[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 128(1): 649-660.

[2] Zhu W Q, Jia J Q, Gao J C, et al. Experimental study on steel reinforced high-strength concrete columns under cyclic lateral force and constant axial load[J]. Engineering Structures, 2016, 125(10): 191-204.

[3] Nishimura Y, Tsutsui S, Baba N. Flexural behavior of steel reinforced concrete columns with T-shaped steel[C]//13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Vancour, Brtish Columbia, Canada, August 1-6, 2004. Vancouver: s. n., 2004: 1338-1345.

[4] 王彦斌.非对称配钢型钢混凝土柱抗震性能试验研究[D].荆州:长江大学, 2012.

[5] 赵程程.非对称配钢型钢混凝土柱轴压比限值研究[D].荆州:长江大学, 2012.

[6] 曾磊,涂祥,吴园园. T 形配钢型钢混凝土构件正截面承载力计算方法[J].工程力学, 2013, 30(10): 115-121, 132.

[7] 王秋维,史庆轩. T 形型钢混凝土柱正截面承载力的计算方法探讨[J].力学与实践, 2008, 30(5): 24-27.

[8] 曾磊,周琴,吴园园,等.非对称配型钢混凝土柱受剪机理及承载力研究[J].建筑结构, 2014, 44(4): 30-34, 43.

[9] 曾磊,吴园园,周琴,等.循环荷载作用下非对称配钢型钢混凝土柱性能退化试验[J].兰州理工大学学报, 2014, 40(6): 124-130.

[10] 韩林海.钢管混凝土结构——理论与实践[M].2 版.北京:科学出版社, 2007.

[11] Attard M M, Setunge S. Stress-strain relationship of confined and unconfined concrete[J]. ACI Materials Journal, 1996, 93(5): 432-442.

[12] 叶列平.劲性钢筋混凝土偏心受压中长柱的试验研究[J].建筑结构学报, 1995, 16(6): 45-52.

(责任编辑: 陈雯)